



Universidad
Carlos III de Madrid

PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO ESTRUCTURAL DE LA CÚPULA DEL REICHSTAG EN BERLÍN

Autor: Arantza Rodríguez Flores

Tutor: Dr. D. José Luís Pérez Castellanos

Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras

Titulación: Ingeniería Industrial, Especialidad: máquinas y estructuras.

Leganés, Julio de 2013

Título: Estudio estructural de la cúpula del Reichstag en Berlín

Autor: Arantza Rodríguez Flores

Director: Dr. D. José Luís Pérez Castellanos

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día ____ de _____
de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



Agradecimientos

El presente proyecto fin de carrera ha sido tutorado por el profesor José Luis Pérez Castellanos, a quién me gustaría expresarle mi agradecimiento por hacerme las cosas tan sencillas. Extenderlo a su vez al departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, ya que han conseguido que descubra a lo que me gustaría dedicarme.

A mis padres, por darme todo lo que necesito y mucho más.

A mi hermano, por apoyarme siempre.

A Dani, por compartir conmigo esta carrera, sufriendo las alegrías y las penas que produce.



AGRADECIMIENTOS



Resumen

En este proyecto fin de carrera se realiza un recorrido histórico a través de las construcciones precedentes y las modificaciones pertinentes que tuvieron lugar antes de la actual cúpula del Reichstag

A continuación se desgrana la geometría de la cúpula actual al detalle para reproducirla a través de un software de elementos finitos. Posteriormente, una vez asumidas las hipótesis de carga pertinentes se realiza un análisis tenso-deformacional de la estructura y se estudia la calidad de los resultados.

Por último, se realizan variaciones en su geometría y en sus condiciones de apoyo para analizar la influencia que tienen en la estructura original.



RESUMEN



Abstract

In this senior thesis we will go through a timeline of the preceding constructions and their pertinent modifications which took place before the current Reichstag's dome.

Afterwards, will be displayed a detailed breakdown of the current dome's geometry to reproduce it through a finite element software. Moreover, once are assumed the pertinent load hypothesis, a stress-strain analysis of the structure is run, and the quality of the results are assessed.

Finally, variations on its geometry and support conditions are applied to analyze the influence of those on its original structure.



ABSTRACT

Índice general

1.Introducción y objetivos.	1
1.1 La cúpula desde el punto de vista arquitectónico.....	1
1.2. Descripción de la estructura	7
1.3. Objetivos	11
2.Métodos y procedimientos.	13
2.1. Modelo de la estructura.	13
2.1.1. Puntos exteriores de la cúpula.....	13
2.1.2. Puntos interiores de la cúpula.....	15
2.2. Materiales y propiedades.....	21
2.2.1 Materiales	21
2.2.2. Propiedades	22
2.2.2.1. Costillas.....	23
2.2.2.2. Anillo de seguridad	26
2.2.2.3. Anillo superior.....	28
2.2.2.4. Trapecio.....	31
2.2.2.5. Pasarela.	33
2.2.2.6. Enganches.	36
2.2.2.7. Resumen de las propiedades de las secciones	38
2.3. Acciones.....	39
2.3.1. Acciones permanentes.....	39
2.3.1.1. Peso propio de las secciones.	40
2.3.1.2. Cristalera.	40



ÍNDICE GENERAL

2.3.1.3. Peso propio del cono.	41
2.3.2. Acciones transitorias.	43
2.3.2.1. Temperatura.	43
2.4. Combinación de acciones.	47
2.4.1. Combinación 1.	48
2.4.2. Combinación 2.	48
2.5. Código de análisis	48
3.Resultados y discusión	51
3.1. Análisis tenso-deformacional	51
3.1.1. La cúpula real	51
3.1.1.1. Peso propio.	52
3.1.1.2. Temperatura.	58
3.1.1.3 Viento.	65
3.1.1.4. Comparación del efecto de las hipótesis elementales en la cúpula real.	69
3.1.2. La cúpula sin rampa	72
3.1.2.1. Peso propio.	73
3.1.2.2. Temperatura.	79
3.1.2.3 Viento.	84
3.1.2.4. Comparación del efecto de las hipótesis elementales en la cúpula sin rampa.	87
3.2. Análisis del efecto de las rampas y de las condiciones de contorno.	87
3.2.1. Efecto de las rampas.	88
3.2.2. Efecto de las condiciones de contorno.	94
3.3. Análisis de diseño.	100
3.4. Análisis modal.	105
4.Conclusiones.	109
5.Trabajos futuros.	111
6.Bibliografía.	113
6.1 Libros	113
6.2 Normas	113
6.3 Páginas o documentos electrónicos en la red	114
Anexo 1	115

Índice de figuras

<i>Figura 1. Diseño de Ludwig Bohnstedt</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2. Diseño de Wallot 1882</i>	<i>3</i>
<i>Figura 3. Bombardeos en el Reichstag.</i>	<i>4</i>
<i>Figura 4. El Reichstag después de los bombardeos.</i>	<i>4</i>
<i>Figura 5. El Reichstag sin cúpula.</i>	<i>5</i>
<i>Figura 6. Cúpula del Reichstag desde el interior</i>	<i>6</i>
<i>Figura 7. Dimensiones exteriores de la cúpula.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 8. Elemento articulado</i>	<i>9</i>
<i>Figura 9. Geometría explosionada.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 10. Geometría completa</i>	<i>10</i>
<i>Figura 11. Vista de la geometría del cono</i>	<i>18</i>
<i>Figura 12. Vista isométrica</i>	<i>19</i>
<i>Figura 13. Vista frontal 1</i>	<i>20</i>
<i>Figura 14. Vista frontal 2</i>	<i>20</i>
<i>Figura 15. Vista en planta</i>	<i>21</i>
<i>Figura 16. Propiedades de la sección</i>	<i>23</i>
<i>Figura 17. Esquema de la geometría de una costilla.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 18. Esquema de la geometría del anillo superior.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 19. Esquema de la geometría del trapecio.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 20. Esquema de la geometría de la pasarela.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 21. Dimensiones de los enganches</i>	<i>37</i>
<i>Figura 22. Parámetros de los enganches</i>	<i>37</i>
<i>Figura 23. Esquema de la geometría del cono.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 24. Coeficiente de exposición.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 25. Valores recomendados de los coeficientes de presión externa para cúpulas de planta circular.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 26. Grados de libertad.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 27. Software informático ANSYS 12.1</i>	<i>49</i>
<i>Figura 28. Geometría BEAM 44.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 29. Deformada del elemento real debida al peso propio.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 30. Desplazamiento vertical del elemento real debido al peso propio.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 31. Tensión axial del elemento real debida al peso propio.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 32. Variación de tensión axial del elemento real debida al peso propio</i>	<i>55</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 33. Distribución de momentos flectores en el elemento real debido a peso propio.</i>	56
<i>Figura 34. Variación de momentos flectores en el elemento real debida al peso propio en una costilla.</i>	56
<i>Figura 35. Tensión máxima del elemento real debida al peso propio</i>	57
<i>Figura 36. Variación de la tensión máxima del elemento real debido a peso propio en una costilla</i>	58
<i>Figura 37. Deformada del elemento real debida a la temperatura.</i>	59
<i>Figura 38. Desplazamiento vertical del elemento real debido a la temperatura.</i>	60
<i>Figura 39. Tensión axial del elemento real debida a la temperatura.</i>	61
<i>Figura 40. Variación de tensión axial del elemento real debida a la temperatura.</i>	62
<i>Figura 41. Distribución de momentos flectores en el elemento real debido a la temperatura.</i>	63
<i>Figura 42. Variación de momentos flectores en el elemento real debido a temperatura en una costilla.</i>	63
<i>Figura 43. Tensión máxima del elemento real debida a la temperatura</i>	64
<i>Figura 44. Variación de la tensión máxima del elemento real debido a la temperatura en una costilla</i>	65
<i>Figura 45. Deformada del elemento real por el viento.</i>	66
<i>Figura 46. Desplazamiento vertical del elemento real debido al viento.</i>	67
<i>Figura 47. Tensión axial del elemento real debido al viento.</i>	68
<i>Figura 48. Distribución de momentos flectores en el elemento real debido al viento.</i>	68
<i>Figura 49. Tensión máxima del elemento real debida al viento.</i>	69
<i>Figura 50. Deformada del elemento sin rampas debida al peso propio.</i>	73
<i>Figura 51. Desplazamiento vertical del elemento sin rampas debido al peso.</i>	74
<i>Figura 52. Tensión axial del elemento sin rampas debida al peso propio</i>	75
<i>Figura 53. Variación de tensión axial del elemento sin rampas debida al peso propio.</i>	75
<i>Figura 54. Distribución de momentos flectores en el elemento sin rampas debido al peso propio.</i>	76
<i>Figura 55. Variación de momentos flectores en el elemento sin rampas debido al peso propio en una costilla.</i>	77
<i>Figura 56. Tensión máxima del elemento sin rampas debida al peso propio.</i>	78
<i>Figura 57. Variación de la tensión máxima del elemento sin rampas debido al peso propio en una costilla.</i>	78
<i>Figura 58. Deformada del elemento sin rampa debida a la temperatura.</i>	79
<i>Figura 59. Desplazamiento vertical del elemento sin rampa debido a la temperatura.</i>	80
<i>Figura 60. Tensión axial del elemento sin rampas debida a la temperatura.</i>	81
<i>Figura 61. Variación de tensión axial del elemento sin rampas debida a la temperatura.</i>	81
<i>Figura 62. Distribución de momentos flectores en el elemento sin rampas debido a la temperatura.</i>	82
<i>Figura 63. Variación de momentos flectores en el elemento sin rampas debido a la temperatura en una costilla.</i>	82
<i>Figura 64. Tensión máxima del elemento sin rampas debida a la temperatura.</i>	83
<i>Figura 65. Variación de la tensión máxima del elemento sin rampas debido a la temperatura en una costilla.</i>	83
<i>Figura 66. Deformada del elemento sin rampas debida al viento.</i>	84
<i>Figura 67. Desplazamiento vertical del elemento sin rampas debido al viento.</i>	85

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 68.Tensión axial del elemento sin rampas debida al viento.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 69.Distribución de momentos flectores en el elemento sin rampas debido al viento.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 70.Tensión máxima del elemento sin rampas debida al viento</i>	<i>87</i>
<i>Figura 71.Vector desplazamiento del elemento real debido al peso propio.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 72.Desplazamientos verticales del elemento real debido al peso de las secciones y de la cristalera.</i>	<i>89</i>
<i>Figura 73. Movimientos y flectores del anillo superior sin el peso del cono.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 74.Vector desplazamiento del elemento sin rampas por peso propio.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 75.Vector desplazamiento del elemento real por temperatura</i>	<i>92</i>
<i>Figura 76.Vector desplazamiento del elemento sin rampa por temperatura.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 77.Vector desplazamiento del elemento real por viento.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 78.Vector desplazamiento del elemento sin rampa por viento.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 79.Tensión axial debida a peso propio en elemento real empotrado</i>	<i>96</i>
<i>Figura 80.Tensión axial debida a peso propio en elemento real apoyado</i>	<i>96</i>
<i>Figura 81.Distribución de momentos flectores debida a peso propio en elemento real empotrado.</i>	<i>97</i>
<i>Figura 82.Distribución de momentos flectores debida a peso propio en elemento real apoyado.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 83.Tensión máxima debida a peso propio en elemento real empotrado.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 84.Tensión máxima debida a peso propio en elemento real apoyado.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 85.Deformada de la estructura en combinación 1 de cargas.</i>	<i>101</i>
<i>Figura 86.Desplazamientos verticales de la estructura en combinación 1 de cargas.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 87.Tensión axial de la estructura en combinación 1 de cargas.</i>	<i>103</i>
<i>Figura 88.Momentos flectores de la estructura en combinación 1 de cargas.</i>	<i>104</i>
<i>Figura 89.Tensión máxima de la estructura en combinación 1 de cargas.</i>	<i>105</i>
<i>Figura 90.Modo de vibración 1.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 91.Modo de vibración 2.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 92.Modo de vibración 3.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 93.Modo de vibración 4.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 94.Modo de vibración 5.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 95.Modo de vibración 6.....</i>	<i>108</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Puntos del anillo de seguridad.</i>	16
<i>Tabla 2. Puntos de los tirantes del cono.</i>	17
<i>Tabla 3. Dimensiones de las costillas.</i>	23
<i>Tabla 4. Dimensiones del anillo de seguridad.</i>	26
<i>Tabla 5. Dimensiones del anillo del anillo superior.</i>	29
<i>Tabla 6. Dimensiones del trapecio</i>	31
<i>Tabla 7. Dimensiones de la pasarela.</i>	34
<i>Tabla 8. Resumen de las propiedades de cada sección.</i>	39
<i>Tabla 9. Presión por línea sobre los meridianos y anillo superior.</i>	41
<i>Tabla 10. Dimensiones del cono.</i>	42
<i>Tabla 11. Categoría del terreno.</i>	44
<i>Tabla 12. Valores de los coeficientes de seguridad</i>	48
<i>Tabla 13. Flecha en el ápice de las hipótesis elementales de la cúpula real.</i>	70
<i>Tabla 14. Variación diametral de las hipótesis elementales de la cúpula real.</i>	70
<i>Tabla 15. Comparación de flechas debidas al peso propio.</i>	95
<i>Tabla 16. Comparación de incremento diametral debido a peso propio.</i>	95
<i>Tabla 17. Puntos de la geometría exterior de la cúpula.</i>	116
<i>Tabla 18. Puntos de la geometría exterior de la cúpula.</i>	117
<i>Tabla 19. Puntos de la geometría exterior de la cúpula.</i>	118
<i>Tabla 20. Puntos de la geometría exterior de la cúpula.</i>	119
<i>Tabla 21. Puntos de la geometría exterior de la cúpula.</i>	120
<i>Tabla 22. Puntos de la geometría exterior de la cúpula.</i>	121
<i>Tabla 23. Puntos rampa 1</i>	122
<i>Tabla 24. Puntos rampa 2.</i>	123

Capítulo 1

Introducción y objetivos.

1.1 La cúpula desde el punto de vista arquitectónico.

Antes de la ubicación actual del Reichstag, el parlamento se situaba en el número 3 de la Leipziger Straße pero éste solamente era regentado por la Federación Alemana del norte.

Posteriormente en 1871, tras la fundación del imperio alemán se hizo necesario el traslado a un lugar con mayor capacidad. Después un intento fallido en el edificio conocido como Preußisches Abgeordnetenhaus, se decidió construir el llamado Reichstag en el año 1871.

Con motivo de realizar esta construcción se hizo un concurso para elegir al arquitecto y conseguir una transición cómoda. Se esperaba que el nuevo edificio estuviera construido en cinco o seis años pero lamentablemente se prolongo hasta los veintitrés.

Uno de los principales motivos de esta tardanza en la construcción fue la elección del terreno, ya que en in principio se opto por la parte oriental de la Königsplatz pero en esos terrenos se ubicaba el palacio del conde Atanazy Raczyński, el cual, no estaba dispuesto a ceder sus propiedades. La comisión destinada a la

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

construcción del Reichstag pensó que contarían con el apoyo del Káiser Guillermo I para presionar al conde, pero éste decidió no inmiscuirse. Por consiguiente, el proyecto del arquitecto Ludwig Bohnstedt que ganó el concurso en 1872 nunca llegó a materializarse.

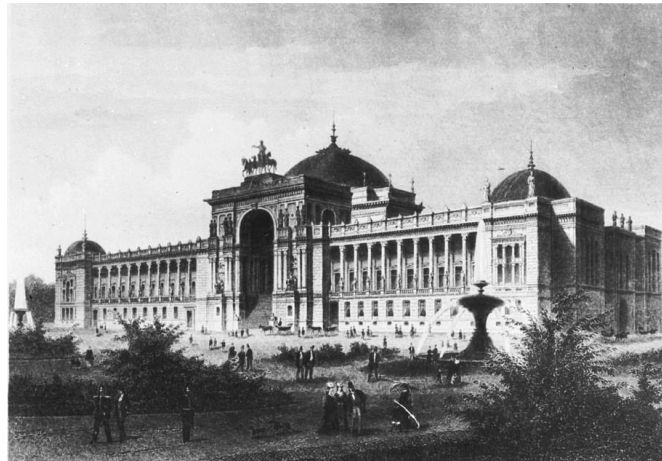


Figura 1. Diseño de Ludwig Bohnstedt

Debido a la persistente negativa, se eligió otra localización, el teatro de la Ópera de Kroll pero este debía ser demolido para realizar el Reichstag. Algunos diputados manifestaban su rechazo por diversas cuestiones, lo que no hizo más que ralentizar todavía más el proceso. Sin embargo, en el 1874 se abrió una posibilidad con la muerte del conde Atanazy Raczyński. Aunque no fue sencillo, se consiguió en 1881 obtener esas tierras a través de una ardua negociación y a cambio de una elevada indemnización a su heredero.

Otro problema más que surgió fue si se debía construir directamente el proyecto elegido en el concurso anterior o se convocaba un nuevo concurso, ya que habían pasado bastantes años. Esto provocó un acalorado debate pero finalmente en febrero de 1882 se decidió realizar un nuevo concurso incluyendo en sus bases que solamente se podrían participar arquitectos alemanes.

No obstante, aunque Ludwig Bohnstedt se volvió a presentar, esta vez su diseño no fue elegido. Los afortunados fueron Paul Wallot, de Fráncfort, y Friedrich von Thiersch, de Múnich. Sin embargo, en la votación final se impuso Wallot a Von Thiersch por solamente dos votos.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

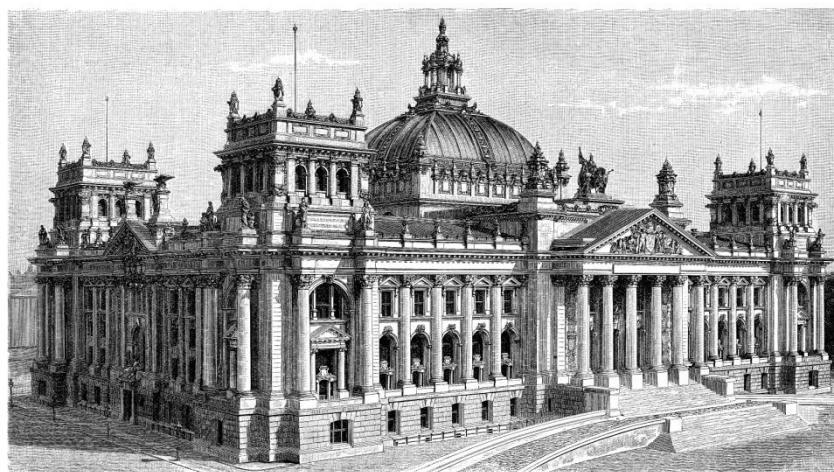


Fig. 1. Westfassade des Reichstagsgebäudes in Berlin. Erbaut 1884-94 nach den Plänen von Paul Wallot.

Figura 2. Diseño de Wallot 1882

Para validar la construcción debían darle el visto bueno diversos organismos, como la academia de ingeniería civil y el ministerio de obras públicas prusiano. Algunos miembros carecían de objetividad por cuestiones personales, lo que no hizo más que manifestaran un sin fin de objeciones y retrasaran hasta el 1884 el comienzo de las obras.

La parte más problemática de la construcción fue la cúpula, ya que obligaron a Wallot a reubicarla y posicionarla en el vestíbulo de entrada. El arquitecto sabía que en un futuro sería necesario deshacer esa modificación por lo que presiono todo lo que pudo para dejarla sobre la sala de plenos, que era su posición inicial. Finalmente, cuando aceptaron que la cúpula se sostuviera en la posición central, la construcción estaba iniciada y las columnas en las que se debía sostener eran muy débiles. Para solucionar este problema, el ingeniero Hermann Zimmermann propuso reducir la altura de la cúpula a 75 metros y cambiar la piedra por una construcción más ligera de acero y cristal. Con este cambio se consiguió que la luz pasara a través de la cúpula e iluminara la sala de plenos.

Ingenierilmente, el Reichstag estaba equipado con todos los avances técnicos de la época. Poseía un equipo de generación eléctrica, calefacción centralizada, ventiladores eléctricos, teléfonos...

Sin embargo todo cambio cuando aconteció el incendio que se produjo en el Reichstag la noche del 27 de febrero del año 1933. Este incendio fue provocado y afecto a la sala de plenos y a varias habitaciones más. Sin embargo, aunque el gobierno nazi culpó a los comunistas, nunca se ha probado a quién perteneció la autoría del mismo.

Más adelante, se realizaron reparaciones en la cúpula pero no en la sala de plenos que se mantenía totalmente calcinada.

Con la llegada de la Segunda guerra mundial se tapiaron todas las ventanas y se utilizo el edificio como lugar para fabricar válvulas de vacío, hospital militar y clínica ginecológica.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Para el ejército rojo, el edificio siempre fue un punto prioritario, pues era considerado uno de los estandartes del régimen socialista, por lo que estuvo sometido a constantes bombardeos.



Figura 3. Bombardeos en el Reichstag.

Después de haber terminado ya la guerra y saliendo Alemania derrotada, el Reichstag se encontraba en un estado de ruina prácticamente.



Figura 4. El Reichstag después de los bombardeos.

En el año 1954, se decidió derruir la cúpula, ya que tras todo lo sucedido se encontraba en una situación muy precaria y no disponía de unas garantías mínimas estructurales. Fueron necesarias varias detonaciones para conseguirlo, ya que la cúpula resistía. En años posteriores, se tomó la decisión de apuntalar el resto del edificio.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS



Figura 5. El Reichstag sin cúpula.

La situación política alemana era muy convulsa, Alemania estaba dividida, sin embargo, en 1955 el Bundestag de la República Federal Alemana acordó la restauración completa del edificio.

El arquitecto Paul Baumgarten fue el encargado de la reconstrucción tras ganar el concurso convocado en el año 1961. Las obras se prolongaron durante doce años y éstas afectaron tanto al exterior, simplificando elementos ornamentales y quitando la cúpula como al interior, doblando el tamaño de la sala de plenos.

En 1991, se decidió que la sede del Bundestag debería estar en Berlín y no en Bonn como se encontraba anteriormente y el lugar elegido fue el edificio del Reichstag pero éste necesitaba modernizarse, para ello en 1993 se convocó un concurso público con bases muy estrictas en cuanto tecnología energética.

Se presentaron ochenta proyectos pero solamente tres fueron preseleccionados. Los arquitectos elegidos fueron Sir Norman Foster, Pi de Brujin y Santiago Calatrava. En primera instancia a la opinión pública no le entusiasmaba el proyecto de Foster, pero tras revisar el proyecto, hizo un diseño nuevo y consiguió imponerse a sus competidores.

Foster había declarado públicamente que no contaba con añadir ningún elemento de elevación sobre el tejado, esto quería decir que no contaría ni con parasoles ni con cúpulas. Pero en el año 1995 cedió a las presiones políticas y diseñó la cúpula de cristal que preside el edificio.

La cúpula estuvo rodeada de polémica, a pesar de maravillar a todo el mundo, Santiago Calatrava se quejó encarecidamente al creer que este diseño era un plagio del que él había presentado con anterioridad. No obstante, las protestas fueron aplacadas al considerar que no eran consistentes.

A finales de 1995 ya se había realizado la preparación de las tareas de acondicionamiento, que consistían en la limpieza del amianto y dejar al descubierto la estructura original. Era condición necesaria respetar la estética de la construcción, por ello, algunas partes de la misma fueron extraídas para reubicarlas posteriormente. Ejemplo de esto, fueron pintadas realizadas por los soldados rusos pero nunca nada de carácter racista o sexista.

La junta de las obras se produjo en 1996, cuando se levantó una nueva estructura encima de la anterior, donde se aloja la sala de plenos. A diferencia con el

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

ideado por Wallot en el que se utilizaron sobretodo piedras caliza y arenisca en el de Foster los materiales utilizados son hormigón, acero y cristal.

En cuanto a la cúpula, esta se ha convertido en uno de los puntos de interés turístico más importante de la ciudad, la cual ronda un promedio de 8000 visitantes al día.

Se sube directamente al tejado, situado a 24 metros de altura, por unos ascensores que están situados en la parte occidental. Sobre el tejado se alza la cúpula., el punto más alto de ésta se encuentra a 47 metros, por lo que es diseño de Foster es de una altura mucho menor al original de Wallot.



Figura 6. Cúpula del Reichstag desde el interior

Se pretendía que el nuevo Reichstag se encontrara a la vanguardia en cuanto al cuidado medioambiental. Para ello, se ha diseñado de tal manera que las pérdidas de calor se minimicen lo máximo posible con el uso de aislamientos especiales. También consta de una superficie mayor de 300m² de placas solares y de dos generadores de biodiesel que satisfacen prácticamente en su totalidad la demanda energética del edificio.

Todo en Reichstag está muy meditado y han conseguido aprovechar el calor que desprende los motores para abastecer a los dispositivos de refrigeración por absorción que generan frío en verano y para calentar agua que es bombeada desde un acuífero subterráneo que sirve para el sistema de calefacción en invierno.

Parte muy importante para conseguir esta filosofía energética es la cúpula, ya que esta sirve para iluminar y ventilar la sala que se sitúa debajo, que no es otra que la sala de plenos. En el medio de cúpula se sitúa un cono enorme que está recubierto de 360 espejos que proyectan la luz, no obstante, también hay pantallas móviles que sirven para evitar el deslumbramiento y el exceso de calor. El interior de este cono sirve para expulsar el aire ya utilizado hacía el exterior. La cúpula también cuenta con un sistema situado justo debajo de la abertura que sirve para acumular el agua de la lluvia.

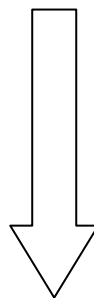
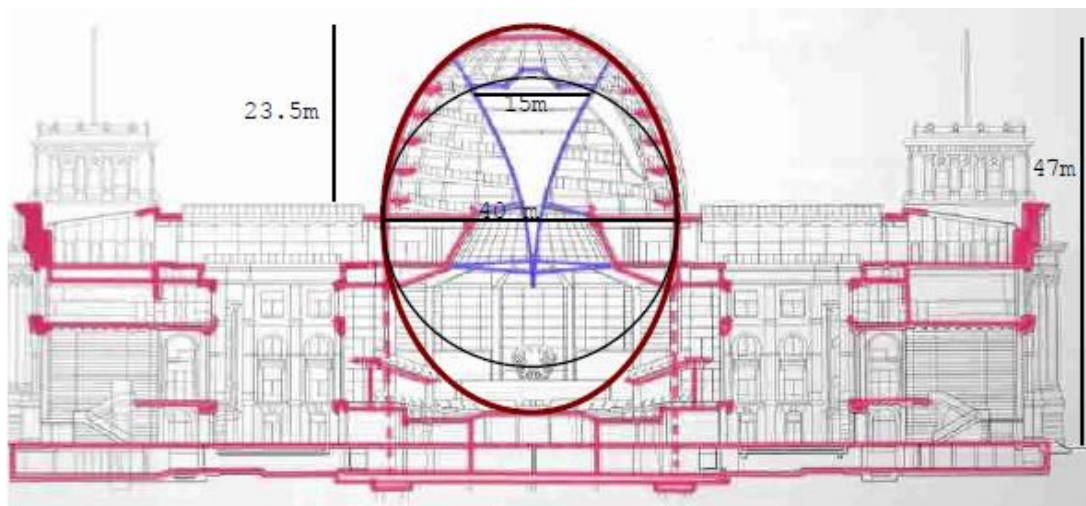
Lo increíble del diseño, es que en su día Wallot ya había hecho un conducto de ventilación que hoy en día sigue siendo utilizado para esta nueva gestión energética.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.2. Descripción de la estructura

La estructura a analizar es una cúpula parabólica elíptica con la parte superior truncada y de planta circular. En el exterior está compuesta de acero y vidrio y consta de veinticuatro costillas meridianas espaciadas quince grados y diecisiete anillos circulares horizontales equidistantes a ciento setenta centímetros.

En su interior posee un cono de 16 m de diámetro invertido, que está sujeto mediante doce nervios a un anillo de refuerzo integrado en la cúpula. El cono, cubierto con trescientos sesenta espejos, tiene la función de volante de inercia, lo que supone que cuando hay excesivo viento, el peso contrarresta el movimiento. En la figura de a continuación se ven las dimensiones exteriores acotadas.



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

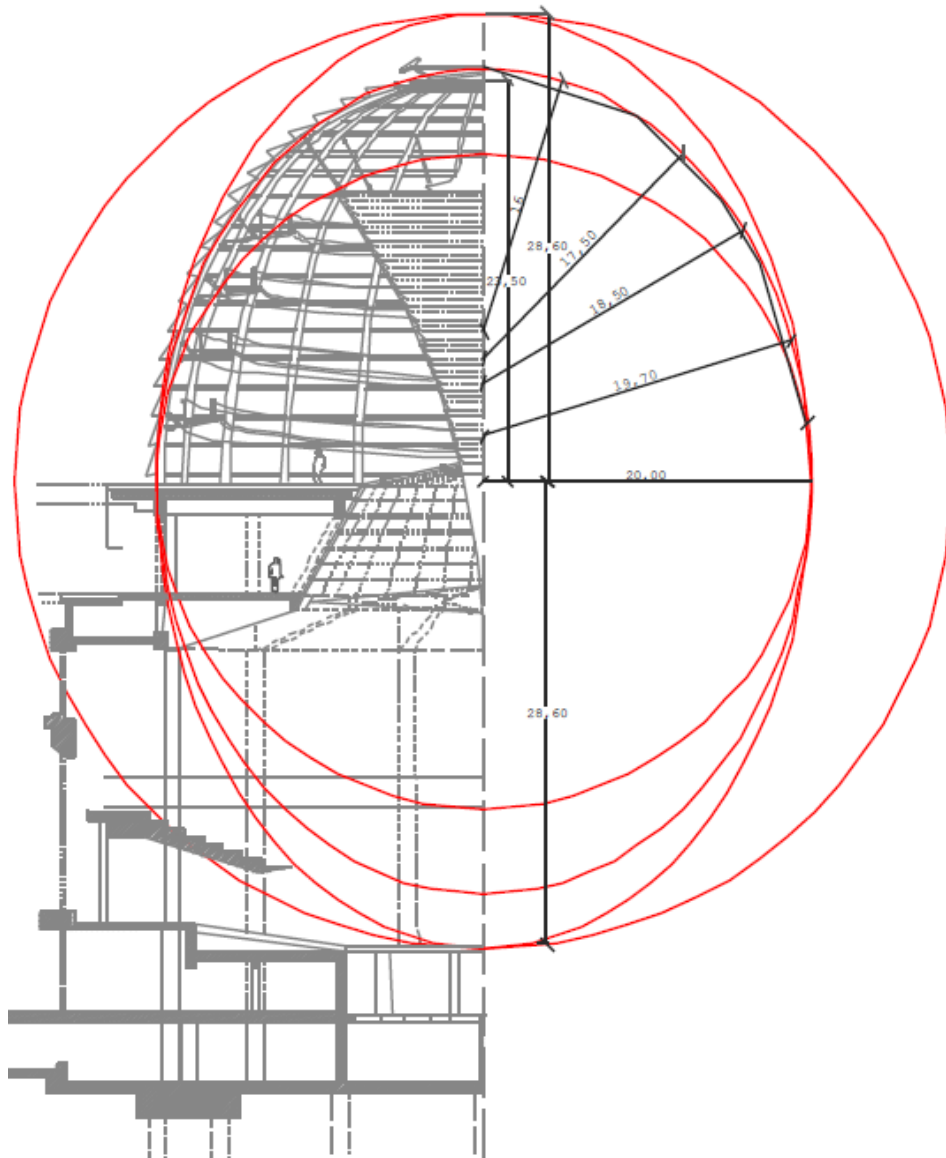


Figura 7. Dimensiones exteriores de la cúpula

Dentro de la cúpula hay dos rampas que describen una espiral situadas en extremos opuestos de la planta circular y desembocan en la parte posterior del cono que se encuentra a 40 metros de altura. Dichas rampas se encuentran sujetas a la cúpula mediante unos elementos articulados, tal como se muestra en la figura siguiente:

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

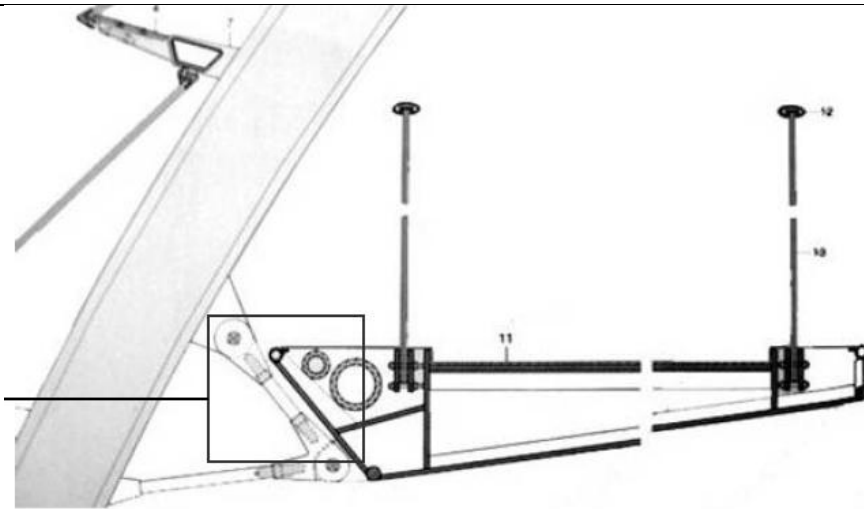


Figura 8. Elemento articulado

Cabe destacar que todos los elementos que posee la cúpula son completamente independientes sin embargo, todo está unido consiguiendo un equilibrio exquisito que se rompería si se modificase cualquier elemento que la compone.

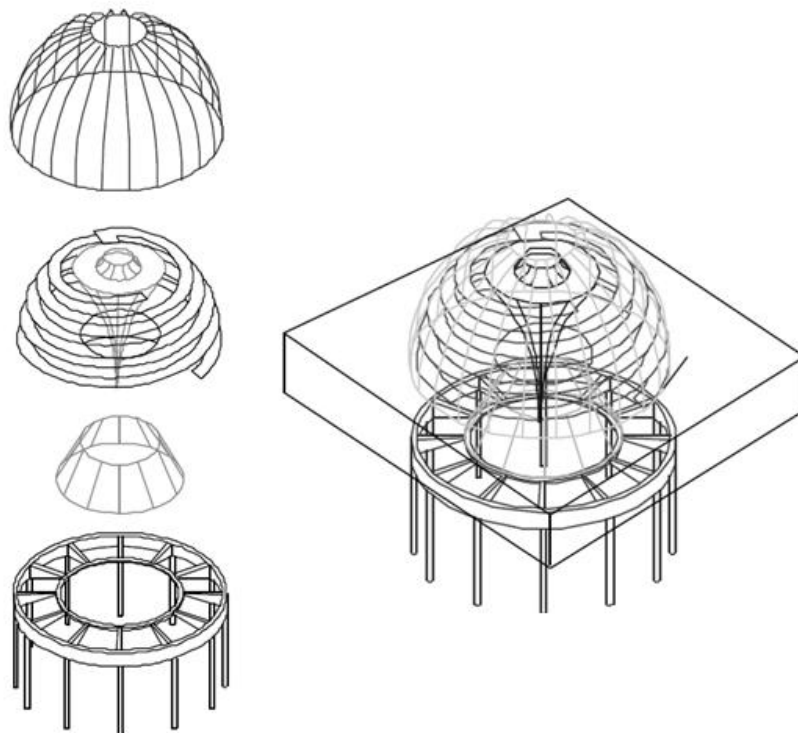


Figura 9. Geometría explosionada.

Por último se muestra en plano, donde se ve la geometría completa.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

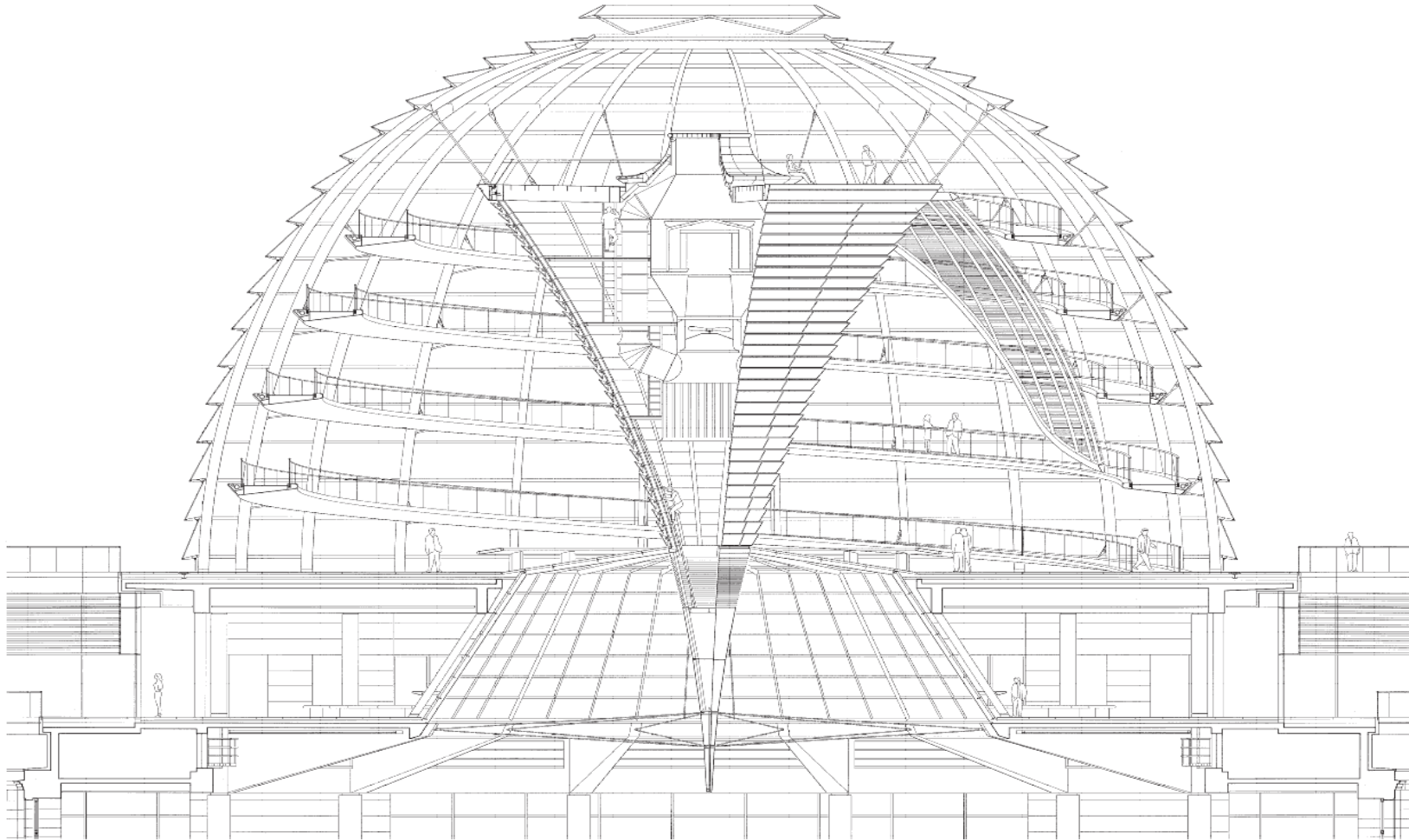


Figura 10. Geometría completa

1.3. Objetivos

Los objetivos de este proyecto fin de carrera son los nombrados a continuación:

- Hacer un modelo numérico lo más fiel posible de la cúpula del Reichstag.
- Realizar un análisis tenso-deformacional de la estructura utilizando el modelo desarrollado.
- Analizar la influencia que puedan tener las rampas en el comportamiento de la estructura.
- Analizar la influencia que pueda tener la modificación de las condiciones de apoyo.



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Capítulo 2

Métodos y procedimientos.

2.1. Modelo de la estructura.

Para realizar el modelo de la estructura se ha considerado que todos los elementos se comportan como elementos vigas que asumen las propiedades que poseen los elementos originales.

En primer lugar se calcularán los puntos que sirven de unión para los elementos exteriores, las costillas y los meridianos, para a continuación calcular los interiores que corresponden al cono, al anillo de seguridad y a la pasarela

2.1.1. Puntos exteriores de la cúpula

Para calcular la posición exacta donde se debe colocar cada punto de unión, se ajustan los puntos a la ecuación de esta elipse, sabiendo que esta truncada a la altura de 23 metros y medio.

$$\frac{x^2}{20^2} + \frac{y^2}{25^2} = 1$$

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Para calcular los puntos de la altura en coordenadas cartesianas, se resuelve mediante la herramienta de cálculo de MathCad, la integral que describe la longitud de una costilla. Esta integral es:

$$P = \int \sqrt{1 + (x')^2}$$

Realizando la derivada la fórmula anterior se obtiene dicha ecuación:

$$P = \int \sqrt{1 + \frac{400 \cdot y^2}{390625 - 625 \cdot y^2}}$$

Por tanto, suponiendo que a la altura donde comienza en primer anillo, se eleva 20 centímetros del suelo y aplicando la ecuación anterior para que todos los puntos disten 1.7m, se obtienen los puntos correspondientes a la altura, donde se ubican los anillos circulares. Las ecuaciones que muestran el cálculo son las siguientes:

$$\int_0^{0.2} \sqrt{1 + \frac{(400y^2)}{390625 - 625y^2}} dy = 0.2$$

$$\int_{0.2}^{1.899} \sqrt{1 + \frac{(400y^2)}{390625 - 625y^2}} dy = 1.7$$

$$\int_{1.889}^{3.582} \sqrt{1 + \frac{(400y^2)}{390625 - 625y^2}} dy = 1.7$$

$$\int_{3.582}^{5.264} \sqrt{1 + \frac{(400y^2)}{390625 - 625y^2}} dy = 1.7$$

$$\int_{5.264}^{6.93} \sqrt{1 + \frac{(400y^2)}{390625 - 625y^2}} dy = 1.7$$

$$\int_{6.93}^{8.575} \sqrt{1 + \frac{(400y^2)}{390625 - 625y^2}} dy = 1.7$$

$$\int_{11.715}^{13.258} \sqrt{1 + \frac{(400y^2)}{390625 - 625y^2}} dy = 1.7$$

$$\int_{13.258}^{14.753} \sqrt{1 + \frac{(400y^2)}{390625 - 625y^2}} dy = 1.7$$

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

$$\int_{8.575}^{10.192} \sqrt{1 + \frac{(400 \cdot y^2)}{390625 - 625 \cdot y^2}} dy = 1.7 \quad \int_{10.192}^{11.775} \sqrt{1 + \frac{(400 \cdot y^2)}{390625 - 625 \cdot y^2}} dy = 1.7$$

$$\int_{14.753}^{16.1905} \sqrt{1 + \frac{(400 \cdot y^2)}{390625 - 625 \cdot y^2}} dy = 1.7$$

$$\int_{16.1905}^{17.561} \sqrt{1 + \frac{(400 \cdot y^2)}{390625 - 625 \cdot y^2}} dy = 1.7$$

$$\int_{17.561}^{18.855} \sqrt{1 + \frac{(400 \cdot y^2)}{390625 - 625 \cdot y^2}} dy = 1.7$$

$$\int_{18.855}^{20.0605} \sqrt{1 + \frac{(400 \cdot y^2)}{390625 - 625 \cdot y^2}} dy = 1.7$$

$$\int_{20.0605}^{21.1654} \sqrt{1 + \frac{(400 \cdot y^2)}{390625 - 625 \cdot y^2}} dy = 1.7$$

$$\int_{21.1654}^{22.1565} \sqrt{1 + \frac{(400 \cdot y^2)}{390625 - 625 \cdot y^2}} dy = 1.7$$

$$\int_{22.1565}^{23.02005} \sqrt{1 + \frac{(400 \cdot y^2)}{390625 - 625 \cdot y^2}} dy = 1.7$$

Una vez se ha calculado la altura, y sabiendo que hay 24 costillas espaciadas 15 grados entre sí, se ha calculado todos los puntos necesarios para construir la geometría exterior de la cúpula. Estos puntos vienen representados en el anexo 1.

2.1.2. Puntos interiores de la cúpula.

El cono se posiciona de modo invertido y consta de un diámetro superior de 16 metros. Este punto está situado a una altura de 16.191 m, es decir, a la altura de séptimo meridiano. A efectos estructurales para la cúpula, no es necesario recrear la geometría

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

del cono, ya que este se puede modelizar distribuyendo su peso entre los doce cables por los que está unido a la estructura exterior cúpula.

Los doce cables están espaciados entre sí 30 grados, lo que implica que se enganchan en costillas alternas. La unión de los cables a la cúpula se establece a través de un anillo de seguridad que se encuentra a la altura del cuarto meridiano. Los cables forman respecto a la horizontal un ángulo de 45 grados que ha sido necesario calcular para realizar la distribución de fuerzas que ejerce el peso del cono y deben soportar los cables.

Por tanto, lo único que es necesario dibujar son los cables y el anillo de seguridad al que están enganchados. Estos son:

A.seguridad $y = 20,15\text{m}$	
x (m)	z (m)
11,838	0,000
-11,838	0,000
0,000	11,838
0,000	-11,838
3,064	11,435
-3,064	11,435
3,064	-11,435
-3,064	-11,435
11,435	3,064
11,435	-3,064
-11,435	3,064
-11,435	-3,064
5,919	10,252
-5,919	10,252
5,919	-10,252
-5,919	-10,252
10,252	5,919
10,252	-5,919
-10,252	5,919
-10,252	-5,919
8,371	8,371
-8,371	8,371
8,371	-8,371
-8,371	-8,371

Tabla 1. Puntos del anillo de seguridad.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Tirantes			
y= 20,15 m		y= 16,191 m	
x (m)	z (m)	x (m)	z (m)
11,838	0,000	8,000	0,000
-11,838	0,000	-8,000	0,000
0,000	11,838	0,000	8,000
0,000	-11,838	0,000	-8,000
5,919	10,252	4,000	6,930
-5,919	10,252	-4,000	6,930
5,919	-10,252	4,000	-6,930
-5,919	-10,252	-4,000	-6,930
10,252	5,919	6,930	4,000
10,252	-5,919	6,930	-4,000
-10,252	5,919	-6,930	4,000
-10,252	-5,919	-6,930	-4,000

Tabla 2. Puntos de los tirantes del cono.

Las dos rampas que posee la cúpula son de geometría idéntica pero cada una comienza en extremos opuestos de la base. Éstas describen una espiral, que consta de dos vueltas y un cuarto, es decir, 810 grados desde el suelo hasta el comienzo del cono. Cada una tiene una longitud de 230 metros aproximadamente.

La rampa está unida a la cúpula mediante unas uniones rígidas de aproximadamente un metro y medio que se encuentran enganchadas en costillas alternas. Resulta necesario, calcular estos puntos, ya que, es por donde hipotéticamente se sitúa la rampa.

Para obtener la ecuación que describe la espiral se necesita conocer la altura que tiene una vuelta completa de la misma, la ecuación que describe la forma de una costilla y el ángulo de avance de la espiral.

Se ha tomado como genérico el punto A, que describe una unión cualquiera entre la rampa y la costilla.

La ecuación que describe la elipse que forma una costilla es la siguiente:

$$\frac{R^2}{20^2} + \frac{y^2}{25^2} = 1$$

Se parte que H_0 es la altura de una vuelta completa de la espiral y se sabe que una vuelta completa tiene 360° , por tanto, podemos calcular a qué altura se encuentra cada punto en función del ángulo que tiene que describir para la unión con una costilla cualquiera.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

En conclusión, la ecuación que describe de forma genérica la altura de cualquier punto es:

$$Y_A = \frac{H_0}{2\pi} \theta_A$$

Si se sustituye la ecuación anterior en la que describe la elipse de la costilla se obtiene como varía R.

$$R_A = 20 - \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{H_0}{2\pi} \theta_A\right)^2}{25^2}}$$

A continuación, se ilustra con un dibujo el desarrollo matemático que se ha seguido:

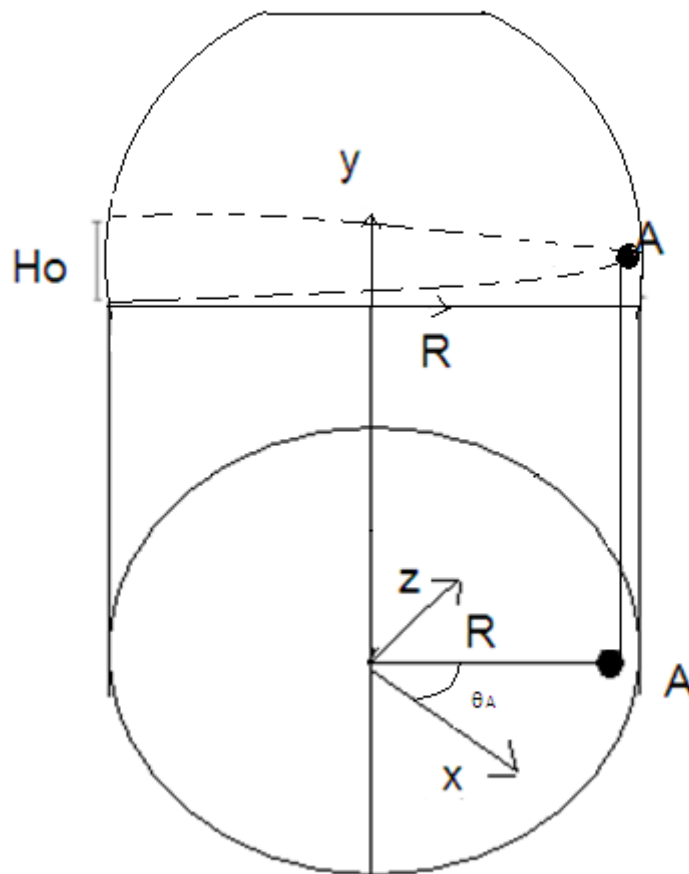


Figura 11. Vista de la geometría del cono

Y, por tanto se obtienen X y Z, de la forma que se muestra a continuación.

$$X_A = R_A \cdot \cos(\theta_A)$$

$$Z_A = R_A \cdot \sin(\theta_A)$$

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Una vez descrito el procedimiento se muestran en el anexo 1 los puntos que se han calculado para ubicar la rampa.

Con todos los puntos que se han calculado anteriormente, ya se puede dibujar el modelo, éste quedaría así:

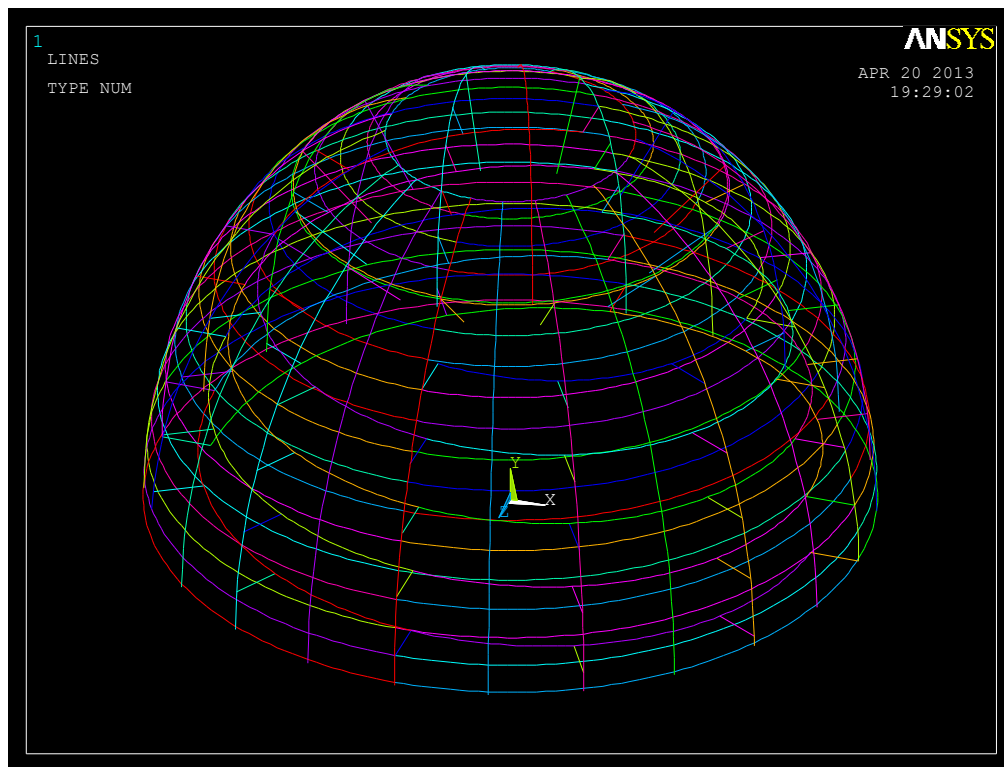


Figura 12. Vista isométrica

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

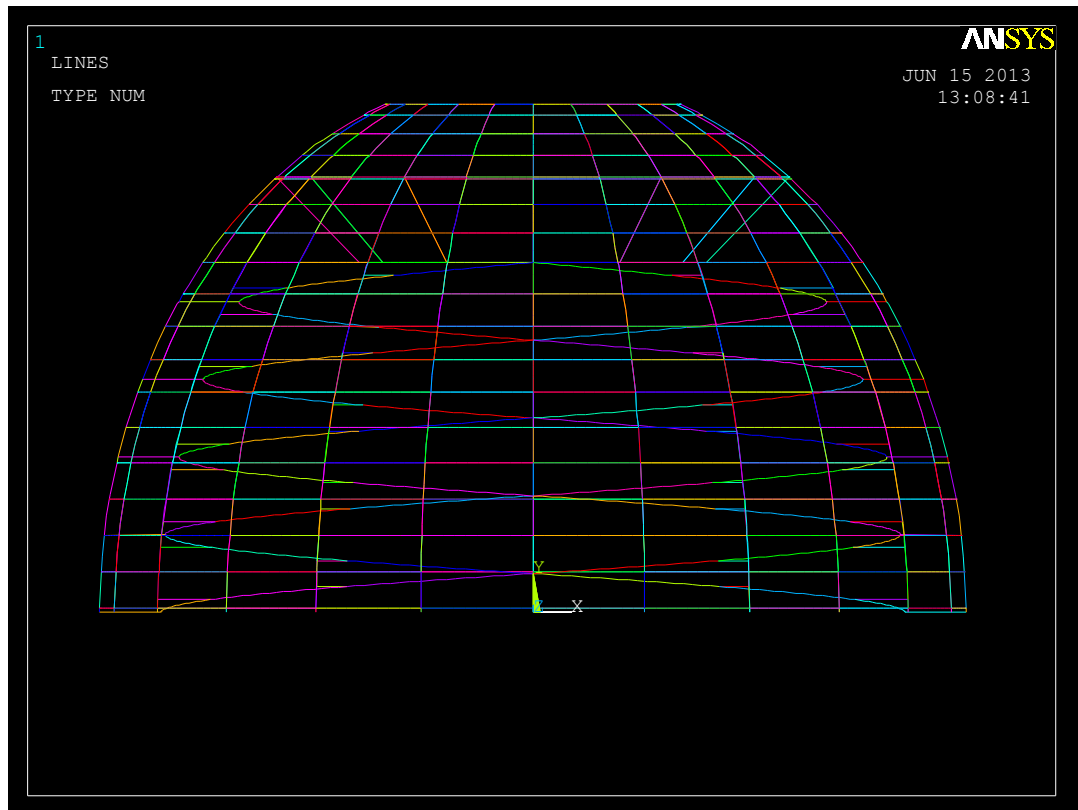


Figura 13. Vista frontal 1

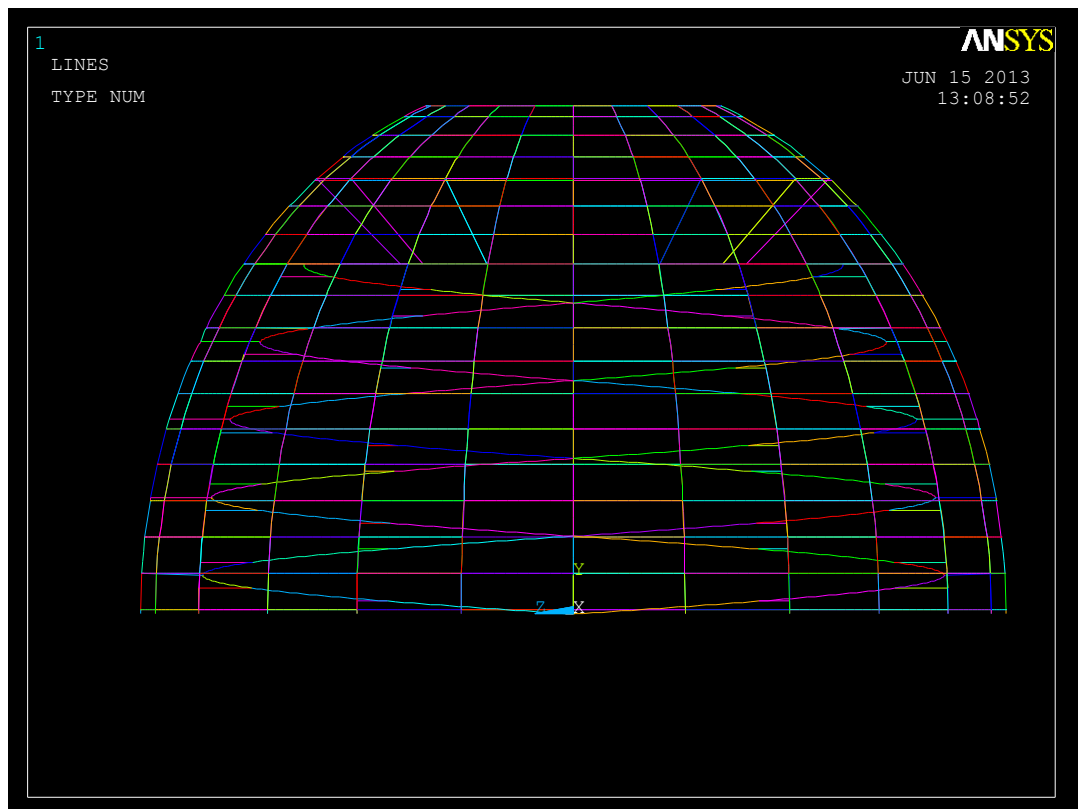
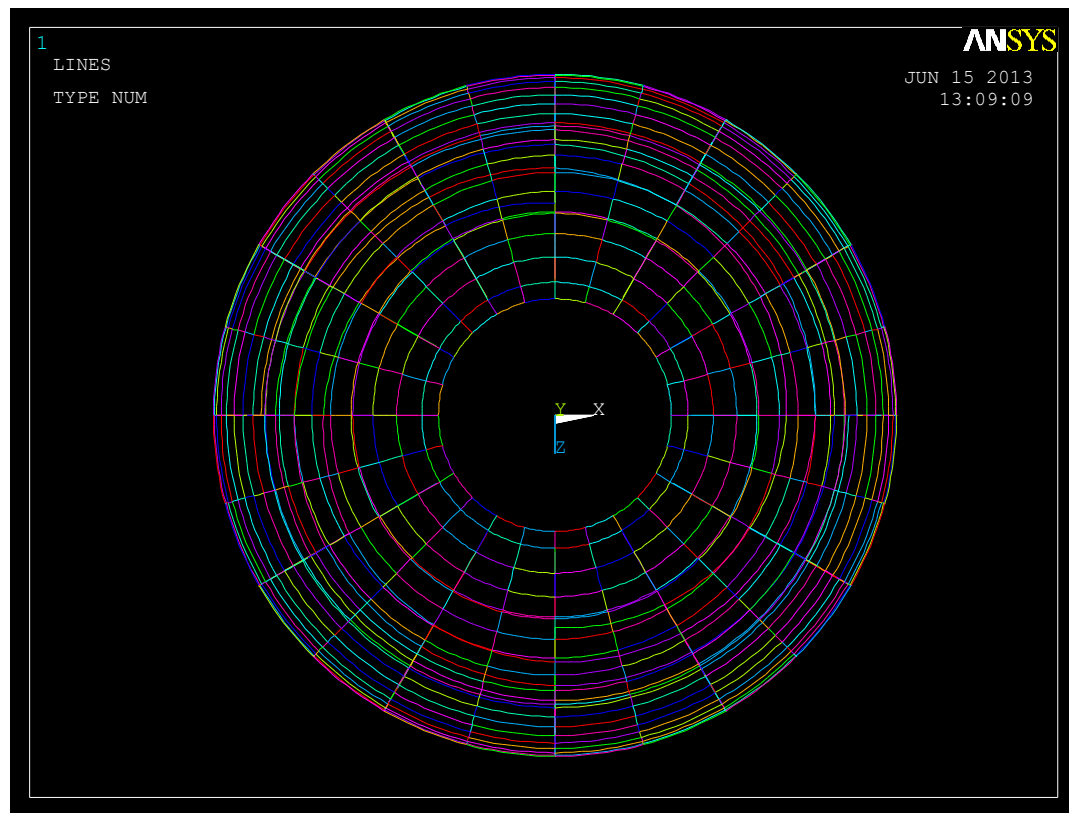


Figura 14. Vista frontal 2

*Figura 15. Vista en planta*

2.2. Materiales y propiedades.

2.2.1 Materiales

El material con el que se ha construido todas las secciones estructurales es el acero. Se ha elegido para realizar el análisis un acero estructural S275JO cuyas propiedades son las siguientes:

- Módulo de Young : $E = 210.000 \text{ Mpa}$
- Módulo de rigidez : $G = 81.000 \text{ Mpa}$
- Tensión a rotura: $F_u = 410 \text{ Mpa}$
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$
- Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- Densidad: $\rho = 7.850 \text{ kg/m}^3$

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

La cristalera, que no es objeto de estudio estructural, pero si aporta al peso que soporta la estructura es de vidrio laminado. Sus propiedades son:

- Módulo de Young : $E = 72.000 \text{ Mpa}$
- Tensión a rotura: $F_u = 10 \text{ Mpa}$
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,23$
- Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha = 9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- Densidad: $\rho = 2.500 \text{ kg/m}^3$

El otro material que interviene es el aluminio, que recubre el cono. Éste al igual que el vidrio solamente afecta al peso.

- Módulo de Young : $E = 70.000 \text{ Mpa}$
- Tensión a rotura: $F_u = 250 \text{ Mpa}$
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,33$
- Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- Densidad: $\rho = 2.700 \text{ kg/m}^3$

2.2.2. Propiedades

Este proyecto fin de carrera se va realizar con el programa Ansys y dentro de esta potente herramienta existe la opción de utilizar una serie de secciones predefinidas por él o por el contrario crear las tuyas propias.

La mayoría de la secciones que se van a utilizar son creadas desde cero y por tanto hay que calcular todas las características estructurales que exige el programa. Estas son las siguientes:

- A : Área de la sección.
- CG_Y y CG_Z : Centro de gravedad de la sección.
- I_Y e I_Z : Momentos de inercia.
- I_{YZ} : Producto de inercia.
- I_w : Constante torsional de alabeo.
- J : Constante torsional.
- SH_Y y SH_Z : Constante de deflexión.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

USER SECTION ?	
A	0
I _{yy}	0
I _{yz}	0
I _{zz}	0
I _w	0
J	0
CG _y	0
CG _z	0
SH _y	0
SH _z	0

Figura 16. Propiedades de la sección

A continuación se describirán detalladamente todas las secciones que se utilizarán para el desarrollo del proyecto.

2.2.2.1. Costillas

Son secciones triangulares huecas con refuerzos circulares en cada punta, como se detalla el dibujo esquemático de a continuación:

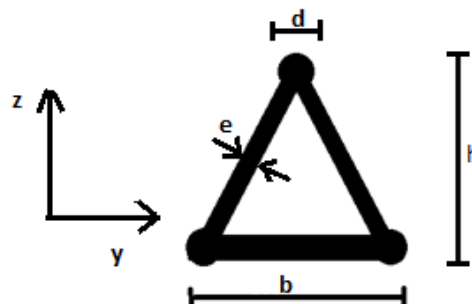


Figura 17. Esquema de la geometría de una costilla

Las dimensiones son las siguientes:

h(mm)	b(mm)	e(mm)	d(mm)
433,013	500	20	50

Tabla 3. Dimensiones de las costillas.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Con estos datos se pueden calcular todas las propiedades geométricas de la sección.

- Área.

El área de una costilla se desarrolla a partir de la siguiente formulación.

$$\text{Área triángulo} = \frac{b \cdot h}{2} - \frac{(b - 2e) \cdot (h - 2e)}{2} = 17860.26 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área círculo} = \pi \frac{d^2}{4} = 1963.5 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área total} = \text{Área triángulo} + 3 \cdot \text{Área círculo} = 23750.76 \text{ mm}^2$$

- Momentos y producto de inercia.

Todos los cálculos de este apartado se hacen referidos al centro de gravedad de la sección.

a. Momento de inercia en el eje y.

$$I_y \text{ triángulo} = \frac{b \cdot h^3}{36} - \frac{(b - 2e) \cdot (h - 2e)^3}{36} = 3,52 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$I_y \text{ círculo} = \frac{\pi R^4}{4} = 3,068 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

Para calcular el momento de inercia en el centro de gravedad de la sección se utiliza Steiner.

$$I_{y\text{total}} = I_y \text{ triángulo} + 3 \cdot I_y \text{ círculo} + A \text{ círculo} \cdot \left(\frac{2h}{3} - \frac{d}{2}\right)^2 + 2 \cdot A \text{ círculo} \cdot \left(\frac{h}{3} - \frac{d}{2}\right)^2$$

$$I_{y\text{total}} = 5,453 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

b. Momento de inercia en el eje z.

$$I_z \text{ triángulo} = \frac{h \cdot b^3}{48} - \frac{(h - 2e) \cdot (b - 2e)^3}{48} = 3,307 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$I_z \text{ círculo} = \frac{\pi R^4}{4} = 3,068 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

De manera análoga al caso anterior se utiliza Steiner

$$I_{z\text{total}} = I_z \text{ triángulo} + 3 \cdot I_z \text{ círculo} + 2 \cdot A \text{ círculo} \cdot \left(\frac{b}{2} - \frac{d}{2}\right)^2$$

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

$$I_{ztotal} = 5,304 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

c. Producto de Inercia.

El producto de inercia tanto del triángulo como de los círculos en su centro de gravedad es cero, no obstante, al no estar los círculos en el centro de gravedad de la sección Steiner juega un papel importante.

$$I_{yz} = I_{yz \text{ triángulo}} + 3 \cdot I_{yz \text{ círculo}} + A_{\text{círculo}}(0) \cdot \left(\frac{h}{3} - \frac{d}{2}\right) + 2 \cdot A_{\text{círculo}} \left(\frac{b}{2} - \frac{d}{2}\right) \cdot \left(\frac{h}{3} - \frac{d}{2}\right)$$

$$I_{yz \text{ total}} = 1,054 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

- Constante de alabeo.

La constante de alabeo, I_W , cuantifica la resistencia que posee un elemento estructural sometido a torsión no uniforme. Este coeficiente se usa para considerar la posibilidad de pandeo en vigas que simultáneamente se encuentran sometidas a compresión y torsión.

No obstante, para secciones estructurales huecas, como en la de este estudio, las deformaciones de alabeo son pequeñas y se tiende a tomar esta constante como cero.

- Constante torsional

La constante torsional de Saint Venant mide la resistencia de un elemento estructural a la torsión pura. Se calcula de modo distinto para cada geometría y posteriormente se refiere a centro de gravedad del conjunto.

Para un perfil cerrado de una sola célula, como es el caso del triángulo se utiliza la siguiente expresión.

$$J_{\text{triángulo}} = \frac{4S_m^2}{\oint_c \frac{ds}{e}} = \frac{4 \cdot \left(\frac{b \cdot h}{2}\right)^2}{\frac{3 \cdot b}{e}} = 6,25 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

Y, para un círculo esta:

$$J_{\text{círculo}} = \frac{\pi d^4}{32} = 6,136 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

Siendo $d_1=d_2=d_3=d$, la distancia de una punta al centro de gravedad del triángulo equilátero de valor igual 288.68mm, podemos calcular la constante torsional de la sección.

$$J_{\text{total}} = J_{\text{triángulo}} + 3 \cdot J_{\text{círculo}} + 3 \cdot A_{\text{círculo}} \cdot d^2 = 1,118 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

- Centro de gravedad de la sección.

Se localiza en:

- $CG_y = 250 \text{ mm}$
- $CG_z = 144.338 \text{ mm}$

- Constante de deflexión.

Se define como la relación del área de sección transversal de la viga real con el área efectiva de resistencia a la deformación del cizallamiento. El cizallamiento constante debe ser igual o mayor que cero.

Se puede considerar que para esta estructura de triángulo equilátero la constante de deflexión es la misma independientemente de para que eje se calcule. El valor que se muestra a continuación está calculado a estima:

$$SH_y = SH_z = \frac{3 \cdot b \cdot e}{2 \cdot (b \cdot e) \cdot 0.6} = 2.5$$

2.2.2.2. Anillo de seguridad

Es de geometría análoga a la de las costillas, por tanto todos los cálculos se realizarán de manera idéntica. Sus dimensiones son las mostradas a continuación:

h(mm)	b(mm)	e(mm)	d(mm)
290.12	335	20	50

Tabla 4. Dimensiones del anillo de seguridad.

- Área

$$\text{Área triángulo} = \frac{b \cdot h}{2} - \frac{(b - 2e) \cdot (h - 2e)}{2} = 11702.4 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área círculo} = \pi \frac{d^2}{4} = 1963.5 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área total} = \text{Área triángulo} + 3 \cdot \text{Área círculo} = 17592.9 \text{ mm}^2$$

- Momentos y producto de inercia.

Todos los cálculos de este apartado se hacen en referencia al centro de gravedad de la sección.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

- a. Momento de inercia en el eje y.

$$I_y \text{ triángulo} = \frac{b \cdot h^3}{36} - \frac{(b - 2e) \cdot (h - 2e)^3}{36} = 9.901 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$I_y \text{ círculo} = \frac{\pi R^4}{4} = 3.068 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

Utilizando Steiner:

$$I_{y \text{ total}} = I_y \text{ triángulo} + 3 \cdot I_y \text{ círculo} + A \text{ círculo} \cdot \left(\frac{2h}{3} - \frac{d}{2}\right)^2 + 2 \cdot A \text{ círculo} \cdot \left(\frac{h}{3} - \frac{d}{2}\right)^2$$

$$I_{y \text{ total}} = 1.758 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

- b. Momento de inercia en el eje z.

$$I_z \text{ triángulo} = \frac{h \cdot b^3}{48} - \frac{(h - 2e) \cdot (b - 2e)^3}{48} = 9.346 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$I_z \text{ círculo} = \frac{\pi R^4}{4} = 3.068 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_{z \text{ total}} = I_z \text{ triángulo} + 3 \cdot I_z \text{ círculo} + 2 \cdot A \text{ círculo} \cdot \left(\frac{b}{2} - \frac{d}{2}\right)^2$$

$$I_{z \text{ total}} = 1.741 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

- c. Producto de Inercia.

$$I_{yz} = I_{yz \text{ triángulo}} + 3 \cdot I_{yz \text{ círculo}} + A \text{ círculo} (0) \cdot \left(\frac{h}{3} - \frac{d}{2}\right) + 2 \cdot A \text{ círculo} \cdot \left(\frac{b}{2} - \frac{d}{2}\right) \cdot \left(\frac{h}{3} - \frac{d}{2}\right)$$

$$I_{yz \text{ total}} = 4.013 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

- Constante de alabeo.

La constante de alabeo, I_w , se toma como cero para secciones estructurales huecas.

- Constante torsional.

$$J_{\text{triángulo}} = \frac{4S_m^2}{\oint_c \frac{dS}{e}} = \frac{4 \cdot \left(\frac{b \cdot h}{2}\right)^2}{\frac{3 \cdot b}{e}} = 1.88 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$J_{\text{círculo}} = \frac{\pi d^4}{32} = 6.136 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Siendo $d_1=d_2=d_3=d$, la distancia de una punta al centro de gravedad del triángulo equilátero de valor igual 196.41mm, podemos calcular la constante torsional de la sección.

$$J_{total} = J_{triángulo} + 3.J_{círculo} + 3.A_{círculo}.d^2 = 4,102.10^8 mm^4$$

- Centro de gravedad de la sección.

Se localiza en:

- $CG_y = 167.5 \text{ mm}$
- $CG_z = 96.707 \text{ mm}$

- Constante de deflexión.

$$SH_y = SH_z = \frac{3.b.e}{2.(b.e).0.6} = 2.5$$

2.2.2.3. Anillo superior.

Esta sección es triangular isósceles con un refuerzo circular en cada punta, tal como se muestra en la figura de a continuación:

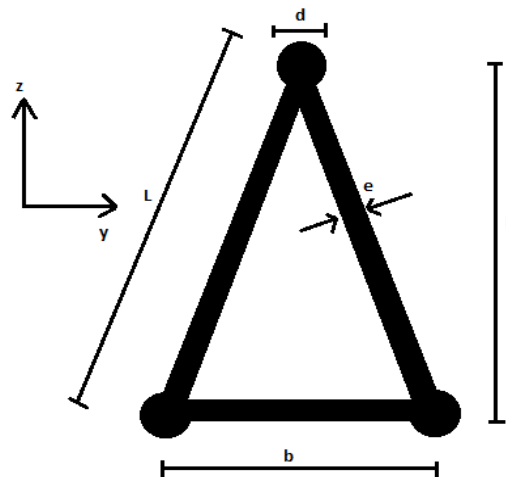


Figura 18. Esquema de la geometría del anillo superior.

Sus dimensiones son las siguientes:

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

h(mm)	b(mm)	L(mm)	e(mm)	d(mm)
497,29	260	514	20	50

Tabla 5. Dimensiones del anillo del anillo superior.

Conociendo estas dimensiones se pueden calcular todas las propiedades necesarias:

- Área.

$$\text{Área triángulo} = \frac{b \cdot h}{2} - \frac{(b - 2e) \cdot (h - 2e)}{2} = 14345.772 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área círculo} = \pi \frac{d^2}{4} = 1963.5 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área total} = \text{Área triángulo} + 3 \cdot \text{Área círculo} = 20236.272 \text{ mm}^2$$

- Momentos y producto de inercia.

Todos los cálculos de este apartado se hacen referidos al centro de gravedad de la sección.

- Momento de inercia en el eje y.

$$I_y \text{ triángulo} = \frac{b \cdot h^3}{36} - \frac{(b - 2e) \cdot (h - 2e)^3}{36} = 3,038 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$I_y \text{ círculo} = \frac{\pi R^4}{4} = 3,068 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

Utilizando Steiner:

$$I_{y \text{ total}} = I_y \text{ triángulo} + 3 \cdot I_y \text{ círculo} + A \text{ círculo} \cdot \left(\frac{2h}{3} - \frac{d}{2} \right)^2 + 2 \cdot A \text{ círculo} \cdot \left(\frac{h}{3} - \frac{d}{2} \right)^2$$

$$I_{y \text{ total}} = 5,670 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

- Momento de inercia en el eje z.

$$I_z \text{ triángulo} = \frac{h \cdot b^3}{48} - \frac{(h - 2e) \cdot (b - 2e)^3}{48} = 8,065 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$I_z \text{ círculo} = \frac{\pi R^4}{4} = 3,068 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_{z \text{ total}} = I_z \text{ triángulo} + 3 \cdot I_z \text{ círculo} + 2 \cdot A \text{ círculo} \cdot \left(\frac{b}{2} - \frac{d}{2} \right)^2$$

$$I_{z \text{ total}} = 1,249 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

c. Producto de Inercia.

$$\begin{aligned} I_{yz} &= I_{yz \text{ triángulo}} + 3 \cdot I_{yz \text{ círculo}} + A_{\text{círculo}}(0) \cdot \left(\frac{h}{3} - \frac{d}{2}\right) \\ &\quad + 2 \cdot A_{\text{círculo}} \left(\frac{b}{2} - \frac{d}{2}\right) \cdot \left(\frac{h}{3} - \frac{d}{2}\right) \\ I_{yz \text{ total}} &= 7,340 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

- Constante de alabeo.

La constante de alabeo, I_w , para secciones estructurales se considera cero.

- Constante torsional.

$$\begin{aligned} J_{\text{triángulo}} &= \frac{4S_m^2}{\oint_c \frac{dS}{e}} = \frac{4 \cdot \left(\frac{b \cdot h}{2}\right)^2}{\frac{3 \cdot b}{e}} = 2,596 \cdot 10^8 \text{ mm}^4 \\ J_{\text{círculo}} &= \frac{\pi d^4}{32} = 6,136 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

En este caso al ser el triángulo isósceles se da el caso que hay dos distancias distintas al centro de gravedad desde las puntas. Dos de ellas se encuentran a $d=d_1=d_2=210.659 \text{ mm}$ y otra a $d_3=331.526 \text{ mm}$. Con ello se obtiene la constante torsional total.

$$\begin{aligned} J_{\text{total}} &= J_{\text{triángulo}} + 3 \cdot J_{\text{círculo}} + 2 \cdot A_{\text{círculo}} \cdot d^2 + A_{\text{círculo}} \cdot d_3^2 \\ &= 6,515 \cdot 10^8 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

- Centro de gravedad de la sección.

Se localiza en:

- $CG_y = 130 \text{ mm}$
- $CG_z = 165.763 \text{ mm}$

- Constante de deflexión.

Se define como la relación del área de sección transversal de la viga real con el área efectiva de resistencia a la deformación del cizallamiento.

En este caso, se distingue entre la cortadura según la altura mayor, en la cual los dos lados largos serán los que más aporten y la cortadura en dirección ortogonal a la anterior, en la que el lado corto será el que más aportaría. Cabe mencionar que el cálculo de estos coeficientes es a estima.

$$SH_y = \frac{2 \cdot L \cdot e + b \cdot e}{b \cdot e + 0,2 \cdot L \cdot e} = 3.55$$

$$SH_z = \frac{2 \cdot L \cdot e + b \cdot e}{2 \cdot (L \cdot e) \cdot 0,8} = 1.566$$

2.2.2.4. Trapecio.

Esta sección trapezoidal corresponde a las costillas de la cúpula y sus dimensiones son las siguientes:

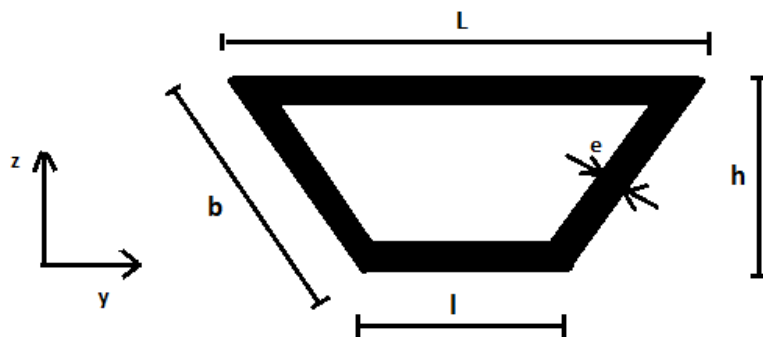


Figura 19. Esquema de la geometría del trapecio.

h(mm)	b(mm)	L (mm)	l (mm)	e(mm)
70	89,023	210	100	20

Tabla 6. Dimensiones del trapecio

Una vez conocidas estas dimensiones, se pueden calcular todas las propiedades necesarias:

- Área.

El área del trapecio obedece a la siguiente expresión:

$$\text{Área trapecio} = \frac{h \cdot (L + l)}{2} - \frac{(h - 2e) \cdot (L - 2e + l - 2e)}{2} = 7400 \text{ mm}^2$$

- Momentos y producto de inercia.

Para realizar los cálculos de este apartado, es necesario descomponer el trapecio en dos triángulos rectángulos y un cuadrado. Posteriormente, se agrupa cada valor referido al centro de gravedad utilizando Steiner.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

- a. Momento de inercia en el eje y.

I_y trapecioext

$$= 2 \cdot \frac{b_{\text{triángulo}} \cdot h^3}{36} + \frac{l \cdot h^3}{12} + 2 \cdot A_{\text{triáng ext.}} (z_{\text{te}} - z_g)^2 + A_{\text{rect ext.}} (z_{\text{re}} - z_g)^2 = 4,244 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

I_y trapecioint

$$= 2 \cdot \frac{(b_{\text{triángulo}} - e) \cdot (h - 2e)^3}{36} + \frac{l \cdot (h - 2e)^3}{12} + 2 A_{\text{triáng int.}} (z_{\text{ti}} - z_g)^2 + A_{\text{rect int.}} (z_{\text{ri}} - z_g)^2 = 9,128 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_{y\text{total}} = I_{y\text{ trapecioext}} - I_{y\text{ trapecioint}} = 3,332 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

- b. Momento de inercia en el eje z.

I_z trapecioext

$$= 2 \cdot \frac{h \cdot b_{\text{triag}}^3}{36} + \frac{h \cdot l^3}{12} + 2 \cdot A_{\text{triáng ext.}} (y_{\text{te}} - y_g)^2 + A_{\text{rect ext.}} (y_{\text{re}} - y_g)^2 = 3,540 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

I_z trapecioint

$$= 2 \cdot \frac{(h - 2e) \cdot (b_{\text{triag}} - e)^3}{36} + \frac{(h - 2e) \cdot l^3}{12} + 2 \cdot A_{\text{triáng ext.}} (y_{\text{ti}} - y_g)^2 + A_{\text{rect ext.}} (y_{\text{ri}} - y_g)^2 = 1,172 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$I_{z\text{total}} = I_{z\text{ trapecioext}} - I_{z\text{ trapecioint}} = 2,368 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

- c. Producto de Inercia.

Solamente aportan al producto de inercia los dos triángulos

$$I_{yz\text{ trapecio ext}} = -2 \cdot \frac{b_{\text{triag}}^2 \cdot h^2}{72} + 2 \cdot A_{\text{triagext}} (z_{\text{te}} - z_g)(y_{\text{te}} - y_g) = -2,9210^6 \text{ mm}^4$$

I_{yz} trapecio int

$$= -2 \cdot \frac{(b_{\text{triag}} - e)^2 \cdot (h - 2e)^2}{72} + 2 \cdot A_{\text{triagint}} (z_{\text{ti}} - z_g)(y_{\text{ti}} - y_g) = 1,845 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{yz\text{total}} = I_{yz\text{ trapecioext}} - I_{yz\text{ trapecioint}} = -4,768 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

- Constante de alabeo.

La constante de alabeo, I_w , para secciones estructurales huecas se suele tomar como cero.

- Constante torsional.

La constante torsional para el trapecio sigue la formulación correspondiente a un perfil cerrado de una sola célula.

Por tanto, su valor es el mostrado a continuación:

$$J_{\text{trapecio}} = \frac{4S_m^2}{\oint_c \frac{dS}{e}} = \frac{4 \cdot \left(\frac{(L+l) \cdot h}{2} \right)^2}{\frac{(L+b+l+b)}{e}} = 1,903 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

- Centro de gravedad de la sección.

Se localiza en:

- $CG_y = 105 \text{ mm}$
- $CG_z = 39.14 \text{ mm}$

- Constante de deflexión.

En este caso, como en el anterior hay que distinguir entre la cortadura en la dirección de la altura y en la dirección ortogonal a ésta. En el primer caso aportan los lados y prácticamente nada las bases y en segundo ocurre lo contrario. A continuación se muestran los coeficientes que se han calculado a estima.

$$SH_y = \frac{2 \cdot b \cdot e + L \cdot e + l \cdot e}{L \cdot e + l \cdot e + 2 \cdot b \cdot e \cdot 0,2} = 1.412$$

$$SH_z = \frac{2 \cdot b \cdot e + L \cdot e + l \cdot e}{2 \cdot (b \cdot e) \cdot 0,6} = 4.568$$

2.2.2.5. Pasarela.

Se ha modelado la pasarela considerándola como un trapecioide de sección hueca, tal y como se muestra en la siguiente figura:

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

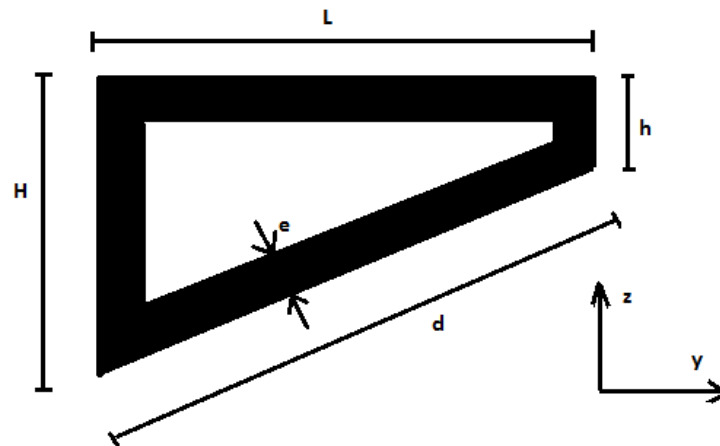


Figura 20. Esquema de la geometría de la pasarela.

Sus dimensiones son las siguientes:

H(mm)	L(mm)	h(mm)	d(mm)	e(mm)
420	1680	180	1697	25

Tabla 7. Dimensiones de la pasarela.

Para realizar los cálculos se descompone la figura anterior en un rectángulo y un triángulo rectángulo.

- Área.

El área del trapecioide se calcula con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 \text{Área pasarela} &= h \cdot L + \frac{(H - h) \cdot L}{2} - (h - 2e) \cdot (L - 2e) \\
 &\quad - \frac{(H - 2e - (h - 2e)) \cdot (L - 2e)}{2} = 96500 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

- Momentos y producto de inercia.

a. Momento de inercia en el eje y.

$$\begin{aligned}
 I_{y \text{ pasarela ext}} &= \frac{L \cdot (H - h)^3}{36} + \frac{L \cdot h^3}{12} + A_{\text{triang ext.}} (z_{te} - z_g)^2 \\
 &\quad + A_{\text{rect ext.}} (z_{re} - z_g)^2 = 1,72 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

$I_{y \text{ pasarela int}}$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(L - 2e) \cdot (H - h)^3}{36} + \frac{(L - 2e) \cdot (h - 2e)^3}{12} \\
 &\quad + A_{\text{triang int.}} (z_{ti} - z_g)^2 + A_{\text{rect int.}} (z_{ri} - z_g)^2 = 1,23 \cdot 10^{10} \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

$$I_{ytotal} = I_{y pasalelaext} - I_{y pasarelaint} = 4.93.10^9 mm^4$$

b. Momento de inercia en el eje z.

$I_{z pasarelaext}$

$$= \frac{(H-h).L^3}{36} + \frac{h.L^3}{12} + A_{triang ext.}(y_{te} - y_g)^2 + A_{rect ext.}(y_{re} - y_g)^2 = 1,154.10^{11} mm^4$$

$I_{z pasarelaint}$

$$= \frac{(H-h).(L-2e)^3}{36} + \frac{(h-2e).(L-2e)^3}{12} + A_{triang ext.}(y_{ti} - y_g)^2 + A_{rect ext.}(y_{ri} - y_g)^2 = 8,86.10^{10} mm^4$$

$$I_{ztotal} = I_{z pasarelaext} - I_{z pasarelaint} = 2.681.10^{10} mm^4$$

c. Producto de Inercia.

Solo aportan al producto de inercia el triángulo.

$$I_{yz pasarela ext} = -\frac{L^2.(H-h)^2}{72} + A_{triagext}(z_{te} - z_g)(y_{te} - y_g) = -6,3510^9 mm^4$$

$$I_{yz pasarela int} = -\frac{(L-2e)^2.(H-h)^2}{72} + A_{triagint}(z_{ti} - z_g)(y_{ti} - y_g) = -1,33.10^9 mm^4$$

$$I_{yztot} = I_{yz pasarelaoext} - I_{yz pasarelaint} = -5,012.10^9 mm^4$$

- Constante de alabeo.

La constante de alabeo, I_w , para secciones estructurales huecas se toma como cero en este caso.

- Constante torsional.

La constante torsional para el trapecioide sigue la formulación correspondiente a un perfil cerrado de una sola célula.

$$J = \frac{4S_m^2}{\oint_c \frac{dS}{e}} = \frac{4 \cdot \left(h.L + \frac{(H-h).L}{2} \right)^2}{\frac{(L+H+d+h)}{e}} = 6,387.10^9 mm^4$$

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

- Centro de gravedad de la sección.

Se localiza en:

- $CG_y = 806.84 \text{ mm}$
- $CG_z = 127.14 \text{ mm}$

- Constante de deflexión.

En el cálculo de estos coeficientes para la pasarela, como en del trapecio, hay que distinguir entre la cortadura en la dirección de la altura, en el cual lo que más aporta son los lados y en la dirección ortogonal a ésta., en la que la mayoría lo aportan las bases. Como en los casos anteriores la formulación utilizada para conseguir estos coeficientes es una estimación.

$$SH_y = \frac{H.e + L.e + h.e + d.e}{L.e + d.e + (H + h).e.0,2} = 1,137$$

$$SH_z = \frac{H.e + L.e + h.e + d.e}{(H + h).e.0,6} = 11,047$$

2.2.2.6. Enganches.

En lo que sigue se denomina “enganche” a cada una de las barras ficticias que unen elementos estructurales. Así, son enganches las barras que unen cúpula y pasarela y las que unen anillo y cono.

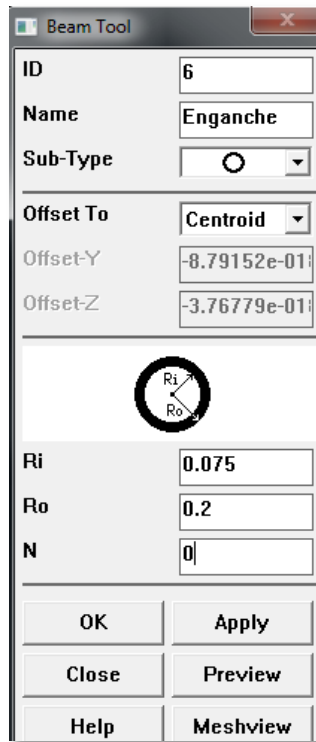
Esta sección se describen las características resistentes de los “enganches”. Estos son de geometría de anillo circular de diámetro exterior 200mm e interior 150mm.

Este tipo de sección es una de las predefinidas en el programa que se va a utilizar, con lo que solamente es necesario especificar los radios y el ansys realizara los cálculos necesarios.

En la figura de a continuación se muestra como se han introducido los parámetros, siendo:

- Ri: Radio interior
- Ro: Radio exterior
- N: Número de células a lo largo de la circunferencia.


CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS



Beam Tool

ID: 6


Name: Enganche

Sub-Type: 

Offset To: Centroid

Offset-Y: $-8.79152e-01$

Offset-Z: $-3.76779e-01$



Ri: 0.075

Ro: 0.2

N: 0

OK Apply

Close Preview

Help Meshview

Figura 21. Dimensiones de los enganches

Introduciendo estos valores en el programa, éste nos devuelve todos los resultados de los parámetros de la sección, que habíamos calculado a mano en las anteriores.

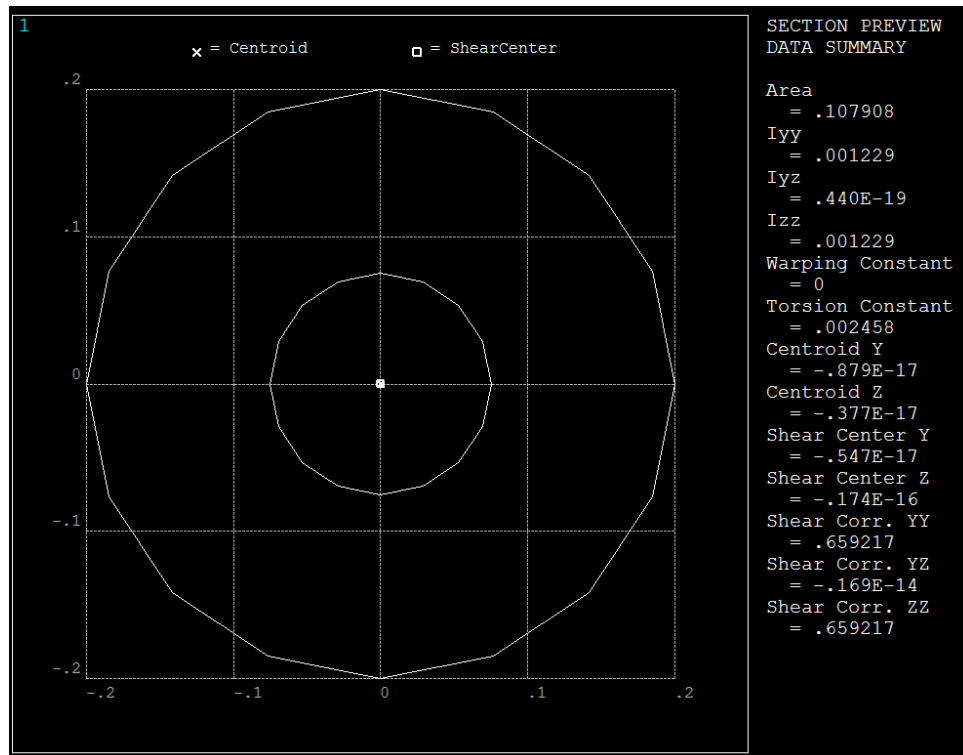


Figura 22. Parámetros de los enganches

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

- Área

$$A_{Enganche} = 107908 \text{ mm}^2$$

- Momentos y producto de inercia.

- a. Momento de inercia en el eje y.

$$I_y Enganche = 1,23 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

- b. Momento de inercia en el eje z.

$$I_z Enganche = 1,23 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

- c. Producto de Inercia.

El producto de inercia del enganche, I_{yz} , es nulo.

- Constante de alabeo.

La constante de alabeo, al ser una sección hueca, es nula.

- Constante torsional.

$$J_{Enganche} = 2,46 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

- Centro de gravedad de la sección.

Se localiza en:

- $CG_y = 200 \text{ mm}$
- $CG_z = 200 \text{ mm}$

Midiendo desde la esquina inferior izquierda como se ha hecho en los casos anteriores.

- Constante de deflexión.

Al ser una sección simétrica en los dos ejes, la constante de deflexión es idéntica para los dos.

$$SH_y = SH_z = 0.659$$

2.2.2.7. Resumen de las propiedades de las secciones

Es esta tabla se muestra un resumen del valor de todos los parámetros calculados para cada tipo de sección.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

RESUMEN	1.Costilla	2.A.seguridad	3.A.superior	4.Trapezio	5.Pasarela	6.Enganches
Area(mm ²)	23750,76	17592,9	20236,272	7400	96500	107908
Iy(mm ⁴)	5,45E+08	1,76E+08	5,67E+08	3,33E+06	4,93E+09	1,23E+09
Iz(mm ⁴)	5,30E+08	1,74E+08	1,25E+08	2,37E+07	2,68E+10	1,23E+09
Pyz(mm ⁴)	1,05E+08	4,01E+07	7,34E+07	-4,77E+06	-5,01E+09	0
Iw	0	0	0	0	0	0
J(mm ⁴)	1,12E+09	4,10E+08	6,52E+08	1,93E+07	6,39E+09	2,46E+09
Cgy(mm)	250	167,5	130	105	806,84	200
Cgz(mm)	144,338	96,707	165,763	39,14	127,14	200
Shy(mm ⁴)	2,5	2,5	3,55	1,412	1,137	0,659
Shz(mm ⁴)	2,5	2,5	1,566	4,568	11,047	0,659

Tabla 8. Resumen de las propiedades de cada sección.

2.3. Acciones.

En dicho apartado se han considerado acciones permanentes y transitorias.

Dentro de las permanentes se encuentran el peso propio de las secciones, el peso de la cristalera y el del cono. A su vez, dentro de las transitorias, solamente se ha decidido incluir la temperatura y el viento.

No se ha considerado la posible sobrecarga que produciría la nieve ya que, por la inclinación que posee la cúpula se ha asumido que esta resbalaría y no influiría en la estructura.

Aunque no se ha realizado un análisis sísmico debido a que la ciudad de Berlín se encuentra en una zona de aceleración de diseño muy baja, se ha hecho un análisis modal para que se puedan contemplar los modos de vibración.

2.3.1. Acciones permanentes.

Este tipo de cargas se deben considerar en todos los supuestos

2.3.1.1. Peso propio de las secciones.

En este apartado se considera solamente el peso de las secciones que se describen en el punto anterior. No es necesario calcular el peso que supone cada una, ya que al insertar en el programa las propiedades del material con el que están construidas y teniendo en cuenta área de las mismas, este ya considera el peso propio para realizar los cálculos.

2.3.1.2. Cristalera.

La parte exterior de la cúpula posee de una cristalera. Para considerar el peso de ésta, se calculará la superficie que ocupa con la ecuación del elipsoide.

$$S = 2\pi \left(c^2 + b\sqrt{a^2 - c^2}E(\alpha, m) + \frac{b \cdot c^2}{\sqrt{a^2 - c^2}}F(\alpha, m) \right) \\ \approx 4\pi \left(\frac{a^p b^p + a^p c^p + b^p c^p}{3} \right)^{1/p}$$

Dónde p toma el valor de 1.6075.

Posteriormente con el espesor se calculara el volumen para que aplicado el concepto de densidad se obtenga el peso.

Considerando un espesor de 25mm, se obtiene que el peso que aporta la cristalera es de 173.7Tn.

Para distribuirlo equitativamente, se calculará el porcentaje de peso que pertenece a cada meridiano y le aplicará una presión de línea a lo largo del mismo, ya que por la geometría de la cúpula el peso de la cristalera entre dos meridianos, lo soporta el superior.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Geometría	Presión de línea (N/m)
Anillo superior	1579,55
Meridiano 1	2549,57
Meridiano 2	2532,16
Meridiano 3	2514,03
Meridiano 4	2491,02
Meridiano 5	2461,61
Meridiano 6	2423,11
Meridiano 7	2377,83
Meridiano 8	2323,60
Meridiano 9	2259,01
Meridiano 10	2103,20
Meridiano 11	2108,15
Meridiano 12	2017,05
Meridiano 13	1914,37
Meridiano 14	1801,34
Meridiano 15	1667,00
Meridiano 16	1539,30
Meridiano 17	171,22

Tabla 9. Presión por línea sobre los meridianos y anillo superior.

2.3.1.3. Peso propio del cono.

El cono posee de la siguiente geometría:

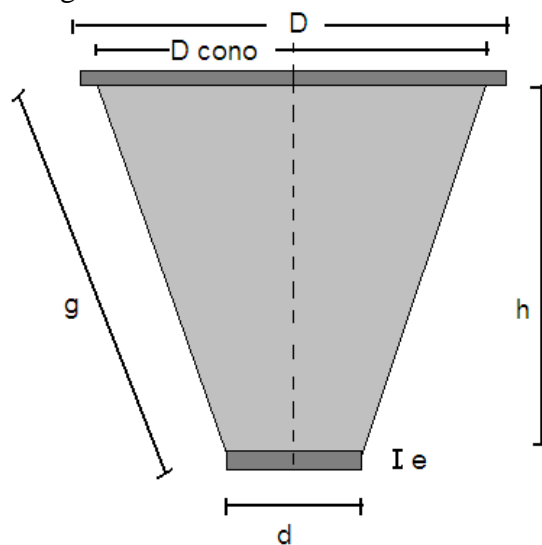


Figura 23. Esquema de la geometría del cono

Y posee las siguientes dimensiones conocidas:

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

h (m)	D (m)	D cono (m)	d (m)	e (m)
17,56	16	15	2.5	0,1

Tabla 10. Dimensiones del cono.

Para calcular la generatriz del cono, se hace mediante esta formulación

$$g = \sqrt{h^2 + \left(\frac{D_{\text{cono}}}{2} - \frac{d}{2}\right)^2} = 18,64\text{m}$$

Dentro del cono se distinguen tres materiales que hay que tener en cuenta para el cálculo del peso. Para cada uno, se calculará el área que ocupa para a continuación con el espesor del mismo obtener el volumen. Éste se multiplicará por la densidad para obtener el peso que aporta cada material al peso total del cono.

- Acero

De este material están hechas las tapas del cono.

$$A_{\text{bases}} = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 + \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 205,97\text{m}^2$$

El espesor de la sección es 0,1m y la densidad $\rho = 7.850 \text{ kg/m}^3$

$$P_{\text{cono acero}} = V_{\text{acero}} \cdot \rho_{\text{acero}} = A_{\text{acero}} \cdot e_{\text{acero}} \cdot \rho_{\text{acero}} = 1,617 \cdot 10^5 \text{kg}$$

- Vidrio

La superficie lateral de cono está recubierta de 360 espejos de espesor 0,1m y densidad $\rho = 2.500 \text{ kg/m}^3$

$$A_{\text{lateral}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{cono}}}{2} + \frac{d}{2}\right) \cdot g = 512,394\text{m}^2$$

$$P_{\text{cono vidrio}} = V_{\text{vidrio}} \cdot \rho_{\text{vidrio}} = A_{\text{vidrio}} \cdot e_{\text{vidrio}} \cdot \rho_{\text{vidrio}} = 1,281 \cdot 10^5 \text{kg}$$

- Aluminio

La superficie lateral también consta de una pequeña lamina de aluminio de espesor 20mm y densidad $\rho = 2.700 \text{ kg/m}^3$

$$A_{\text{lateral}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{cono}}}{2} + \frac{d}{2}\right) \cdot g = 512,394\text{m}^2$$

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

$$P_{\text{conoAl}} = V_{\text{Al}} \cdot \rho_{\text{Al}} = A_{\text{Al}} \cdot e_{\text{Al}} \cdot \rho_{\text{Al}} = 2,767 \cdot 10^4 \text{ kg}$$

Por tanto si se suma el peso que aportan los tres materiales, se obtiene que el peso total del cono es:

$$P_{\text{total cono}} = 3,174 \cdot 10^5 \text{ kg}$$

No obstante, como los elementos que conectan el cono con la cúpula son doce tirantes, el peso que le corresponde a cada tirante es:

$$P_{\text{tirante cono}} = \frac{P_{\text{total cono}}}{12} = 2,645 \cdot 10^4 \text{ kg}$$

Los tirantes del cono forman un ángulo de 45 grados con la horizontal, y por tanto para llevar el peso del cono a los cables se divide en dos fuerzas, una radial y otra vertical, de valor mostrado a continuación por cada tirante del cono.

$$P_{\text{tirante radial}} = P_{\text{tirante cono}} \cdot \cos(45) = 1,835 \cdot 10^5 \text{ N}$$

$$P_{\text{tirante vertical}} = P_{\text{tirante cono}} \cdot \sin(45) = 1,835 \cdot 10^5 \text{ N}$$

2.3.2. Acciones transitorias.

2.3.2.1. Temperatura.

El proceso de construcción de la cúpula del Reichstag se dilato más de un año, este comenzó en junio de 1997 y finalizó en septiembre del 1998, por tanto resulta imposible fijar a que temperatura ha sido construido.

Para no infravalorar posibles efectos térmicos y ante la falta de datos más precisos se ha decidido considerar los dos valores extremos máximos de temperatura registrados en Berlín.

- $T^{\text{a}}_{\text{mínima}} \text{ registrada: } -26.1^{\circ}\text{C}$
- $T^{\text{a}}_{\text{máxima}} \text{ registrada: } 38.8^{\circ}\text{C}$

Con estos valores se va a aplicar un incremento térmico de temperatura de:

$$\Delta T = T^{\text{a}}_{\text{máx}} - T^{\text{a}}_{\text{mín}} = 64.9^{\circ}\text{C}$$

Considerando la posición más desfavorable, se supone que el sol está en su punto cenital y alcanza a toda la estructura por igual.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

2.3.2.2. Viento.

Para obtener este valor, se ha consultado la norma del Eurocódigo 1, correspondiente a acciones en estructuras, (UNE-EN 1991-1-1:2003/AC).

Lo primero que ha sido necesario calcular es la presión correspondiente a la velocidad de pico, que se rige por la siguiente expresión:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot l_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = C_e(z) \cdot q_b$$

- ρ : Es la densidad del aire, que depende de la temperatura y de la presión barométrica esperada en la zona. Puede tomarse el valor 1.25 kg/m^3 como una muy buena aproximación.
- $C_e(z)$: Es el factor de exposición. Este se calcula en función de la altura y la categoría del terreno. Para calcular lo segundo hay que identificar una clase en la tabla 14.

Categoría de terreno		z_0 m	z_{min} m
0	Mar abierto o zona costera expuesta al mar abierto	0,003	1
I	Lagos o áreas planas y horizontales con vegetación despreciable y sin obstáculos	0,01	1
II	Áreas con vegetación baja, como hierba, y obstáculos aislados (árboles, edificaciones) con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos	0,05	2
III	Áreas con una cobertura de vegetación uniforme o edificaciones o con obstáculos aislados con una separación máxima de 20 veces la altura de los obstáculos (villas, terreno suburbano, bosques permanentes)	0,3	5
IV	Áreas en las que al menos un 15% de la superficie está cubierta por edificios cuya altura media supera los 15 m	1,0	10
NOTA – Las categorías de terrenos se ilustran en el capítulo A.1.			

Tabla 11. Categoría del terreno.

Y por último para obtener el coeficiente se entra la figura 24 con la altura y la categoría del terreno.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

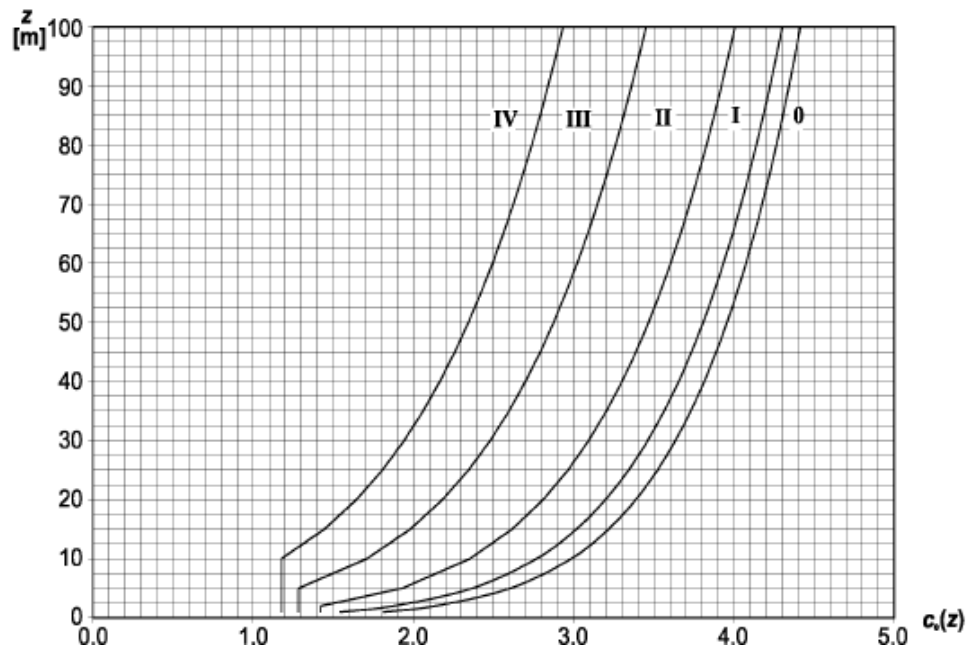


Figura 24. Coeficiente de exposición.

- q_b : Es la presión correspondiente a la velocidad media de referencia. Se obtiene con la siguiente expresión:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2$$

Se toma como valor para la velocidad media de referencia $v_b = 26 \text{ m/s}$, con lo que se obtiene la presión correspondiente a la velocidad media como:

$$q_b = 422.5 \text{ N/m}^2$$

Este preámbulo pretende explicar cómo se puede obtener la presión correspondiente a la velocidad de pico para distintas alturas. La cuál será necesaria para calcular la presión que ejerce el viento tanto sobre la superficie exterior como la interior.

La presión sobre el viento en superficies exteriores se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot C_{pe}$$

- $q_p(z_e)$: Es la presión correspondiente a la velocidad de pico.
- z_e : Es la altura referencia de la presión externa.
- C_{pe} : Coeficiente de presión para la presión exterior.

Eliendo el caso de cúpulas de planta circular, y basándonos en la siguiente figura:

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

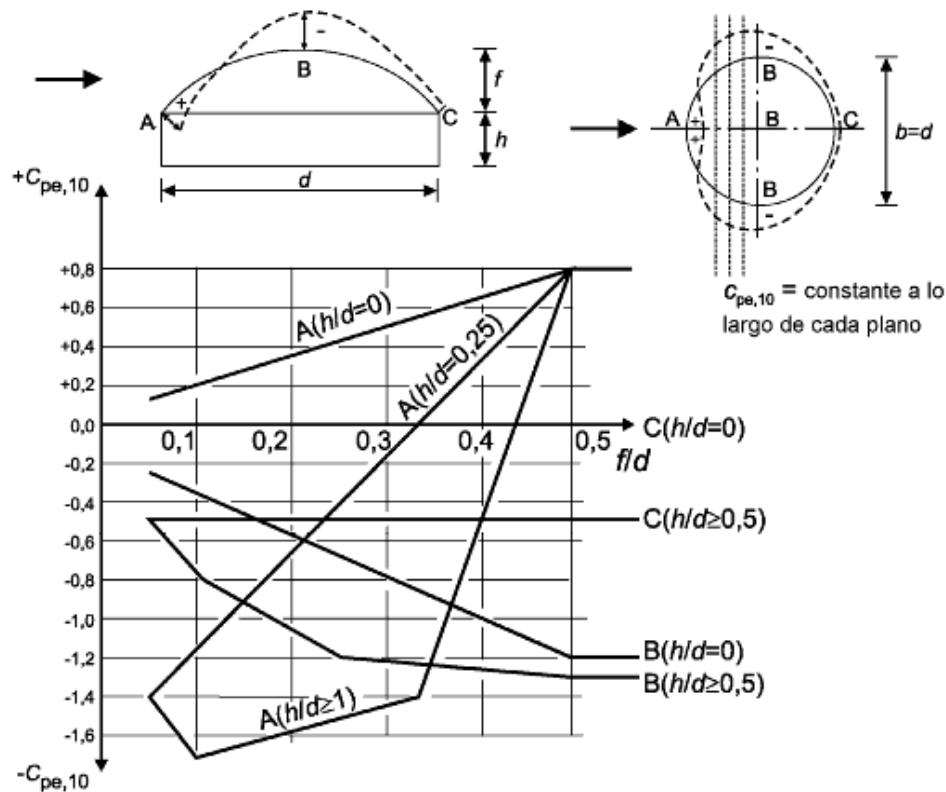


Figura 25. Valores recomendados de los coeficientes de presión externa para cúpulas de planta circular.

En este caso $f/d = 0.625$ y $h/d = 0$, con estos datos tenemos:

- Punto A: $C_{pe} = 0.8$
- Punto B: $C_{pe} = -1.2$
- Punto C: $C_{pe} = 0$

La altura z_e la marca la suma de h y f , por tanto es este caso será 23.5 metros, obteniendo como se ha explicado anteriormente $q_p(z_e)$, el valor obtenido es 802.75 N/m^2 .

Por tanto aplicando la fórmula de la presión del viento en superficies exteriores se obtiene:

- Punto A: $w_{eA} = 642.2 \text{ N/m}^2$
- Punto B: $w_{eB} = -963.2 \text{ N/m}^2$
- Punto C: $w_{eC} = 0 \text{ N/m}^2$
- El resto de los puntos intermedios se calcularán mediante interpolación lineal.

La presión sobre el viento en superficies interiores se obtiene mediante la siguiente ecuación:

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

$$w_i = q_p(z_i) \cdot C_{pi}$$

Se considera que la presión interna y externa actúan al mismo tiempo y siempre en la situación más desfavorable. Se ha supuesto, que el hueco del agujero de la parte superior, es al menos tres veces el resto de los huecos de la fachada. Por lo que C_{pi} toma los siguientes valores:

- Punto A: $C_{pi} = 0.9C_{pe} = 0.72$
- Punto B: $C_{pi} = 0.9C_{pe} = -0.96$
- Punto C: $C_{pi} = 0.9C_{pe} = 0$

Con los coeficientes anteriores, se obtienen los valores de presión interna:

- Punto A: $w_{iA} = 577.98 \text{ N/m}^2$
- Punto B: $w_{iB} = -770.64 \text{ N/m}^2$
- Punto C: $w_{iC} = 0 \text{ N/m}^2$
- El valor de presión interna en el resto de los puntos se obtendrá interpolando linealmente los puntos anteriores.

2.4. Combinación de acciones.

Para realizar la combinación de acciones nos basaremos en el Eurocódigo 3, que es el relativo al acero.

Tal y como se han visto en apartados anteriores todas las acciones que sufre la estructura son de carácter persistente o transitorio, por tanto a la hora de mayorar las acciones solamente se considera este supuesto. La formulación por la que se rige es la siguiente:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \varphi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Donde:

G son las acciones persistentes.

Q son las acciones transitorias.

γ Los coeficientes de seguridad

φ Los coeficientes de simultaneidad.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Los coeficientes de seguridad varían dependiendo de cómo sea la carga y de cómo actúe en la estructura.

	Persistente (γ_G)	Transitorio (γ_Q)
Favorable	1,5	1,5
Desfavorable	0,8	0

Tabla 12. Valores de los coeficientes de seguridad

No obstante, en este análisis se ha considerado que todas las acciones que actúan en la estructura son desfavorables.

Los coeficientes de simultaneidad solamente afectan a las acciones transitorias y varían dependiendo de la clase de acción que sea. En este caso las únicas acciones que existen son el viento y la temperatura, y en ambas toma el valor de 0.6.

Por tanto bajo las hipótesis anteriores se tendrán solamente dos combinaciones de carga posibles, ya que las acciones permanentes actúan siempre.

2.4.1. Combinación 1.

En esta combinación, la temperatura será la sobrecarga principal. Por tanto, no estará bajo la influencia del coeficiente de simultaneidad.

2.4.2. Combinación 2.

En esta combinación, el viento será la sobrecarga principal y la temperatura estará en combinación.

2.5. Código de análisis

El método de los elementos finitos, está basado en la división discreta de los sólidos iniciales en pequeños conjuntos de elementos que se conectan entre sí a través de nodos. Dichos elementos se rigen por las mismas leyes que el cuerpo inicial, y debido a esto,

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

se pasa de un sistema continuo gobernado por ecuaciones diferenciales con infinitos grados de libertad a un sistema discreto que tiene un número finito de ecuaciones que pueden ser lineales o no y un número acotado de grados de libertad.

Una de las partes más importantes del sistema son los nodos, ya que su misión es conectar entre sí a los distintos elementos y en ellos se aplican las incógnitas del sistema. Un ejemplo de esto en el ámbito estructural serían los desplazamientos nodales pero en otras disciplinas como la térmica, eléctrica o magnética las incógnitas que se producen en los nodos serían la temperatura, el voltaje o el potencial magnético respectivamente. Volviendo al caso estructural, se puede decir que un nodo posee seis grados de libertad: Traslación y rotación en los tres ejes como se puede observar en la figura 26, aunque en muchas ocasiones la mayoría de ellos estén impedidos por las condiciones de contorno.

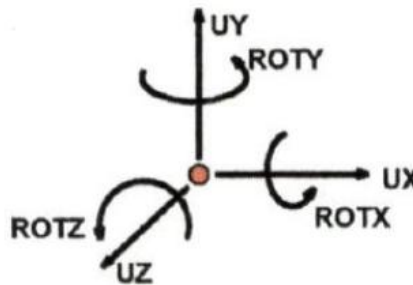


Figura 26. Grados de libertad.

Por tanto, a modo de pequeño resumen se puede decir que en un sistema a analizar hay tres elementos básicos que hay que distinguir: El dominio (espacio geométrico donde se aloja el sistema a analizar), las condiciones de contorno (variables que son conocidas y sirven para restringir el sistema) y las incógnitas (las variables que se quieren hallar).

Para la realización de este proyecto se utilizó el software Ansys, que es uno de los muchos programas informáticos que existen para el análisis estructural a través del MEF.

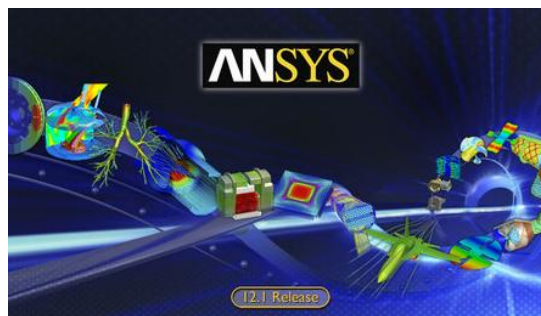


Figura 27. Software informático ANSYS 12.1

Esta herramienta posee muchos elementos que se pueden elegir para recrear una geometría, no obstante para este trabajo sólo ha sido necesario utilizar un elemento viga.

CAPÍTULO 2: MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Dentro de los muchos elementos viga que posee, nos hemos decantado por el BEAM 44.

Es un elemento uniaxial de tensión, compresión, torsión, y flexión. Consta de seis grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones ‘‘x’’, ‘‘y’’, y ‘‘z’’ y rotaciones sobre el eje ‘‘x’’, ‘‘y’’, y ‘‘z’’. Este elemento permite una geometría asimétrica diferente en cada extremo y permite que los nodos de extremo puedan ser desplazados del eje centroidal de la viga.

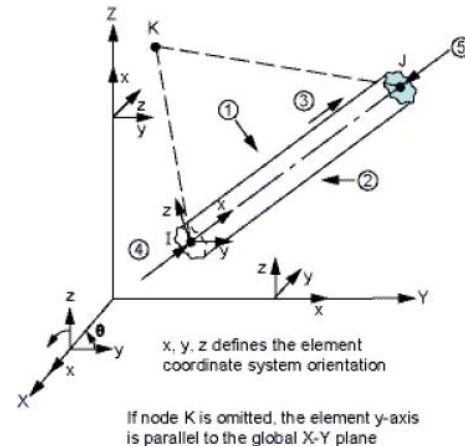
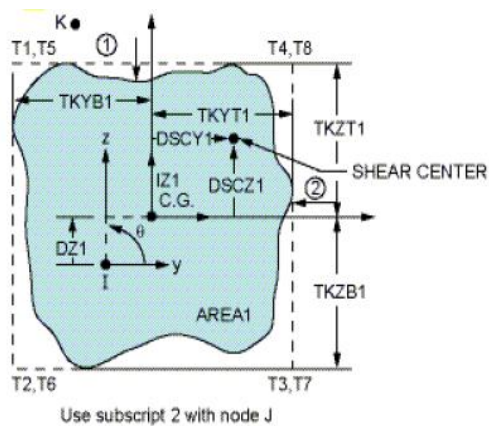


Figura 28. Geometría BEAM 44.

Capítulo 3

Resultados y discusión

3.1. Análisis tenso-deformacional

En este apartado se va a estudiar distintos aspectos estructurales de la cúpula real y de la cúpula sin las rampas.

3.1.1. La cúpula real

En este apartado bajo el supuesto de que la estructura esta empotrada en los puntos de unión contra en suelo, se va a analizar lo que aporta a la estructura cada carga por separado.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.1.1. Peso propio.

La carga de peso propio consiste en él que aportan todas las secciones incluyendo la pasarela, el peso de la cristalera y el del cono.

Al resolver el sistema se observa cómo se deforma la estructura respecto a la original

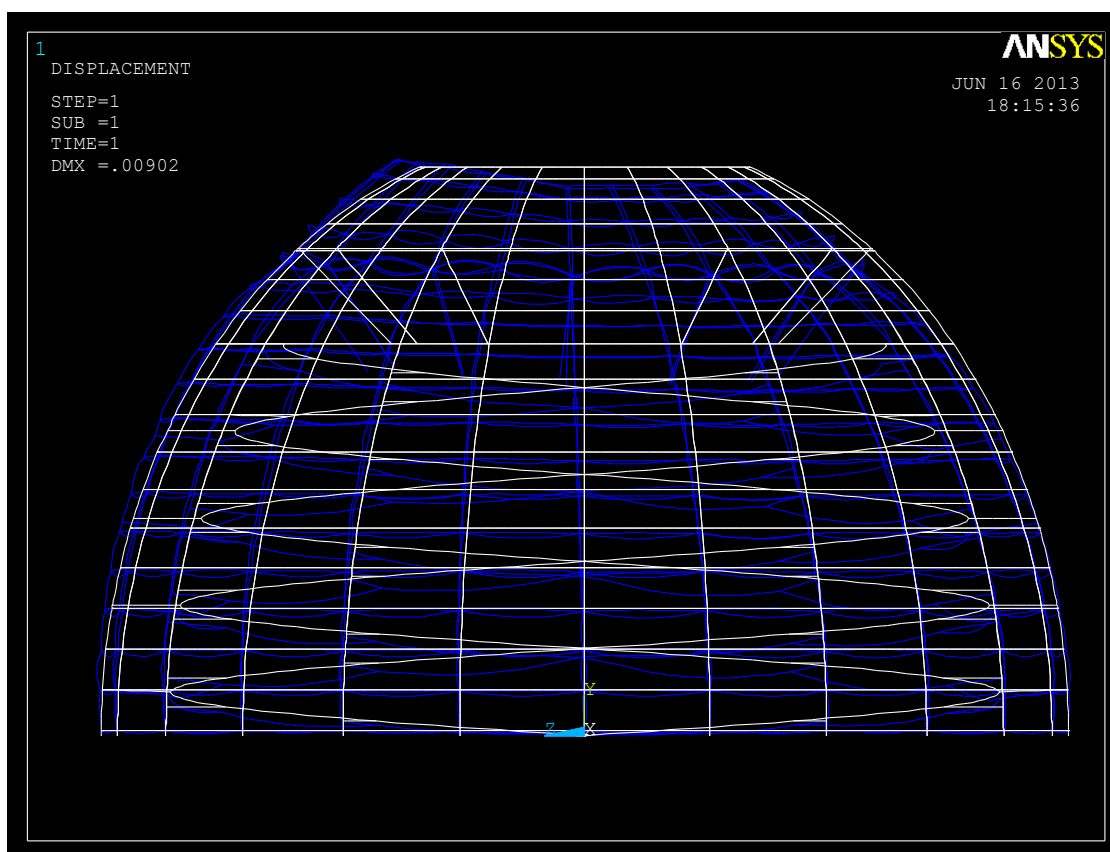


Figura 29. Deformada del elemento real debida al peso propio.

Tal y como se ve en la imagen, la cúpula no se deforma de un modo simétrico sufriendo un repunte en un lado del ápice. Esto es debido al efecto que provoca las rampas en el conjunto, ya que al no ser simétricas perjudica más un extremo que otro ya que la estructura no es axial simétrica.

Las distintas flechas que se pueden observar en el ápice de la cúpula se ilustran en los desplazamientos verticales que se muestran la siguiente figura:

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

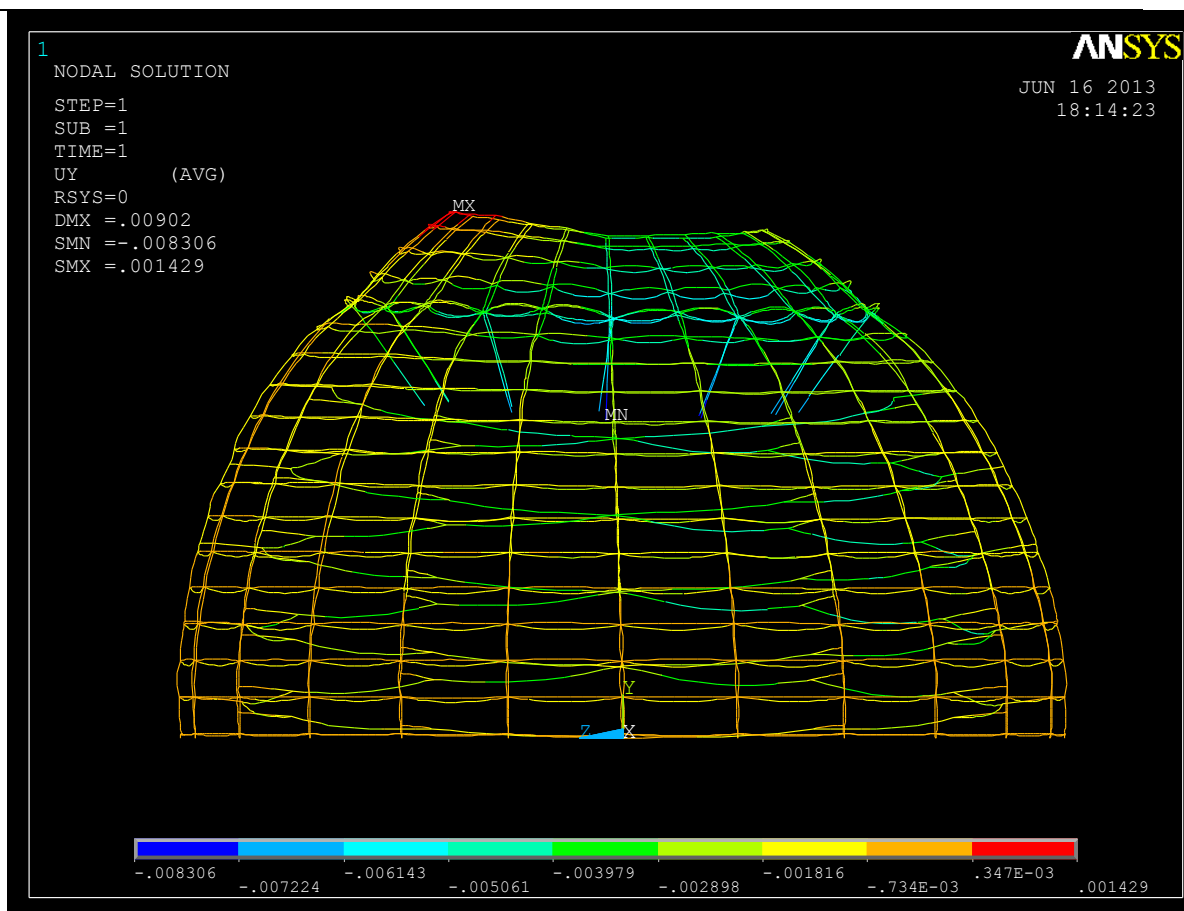


Figura 30. Desplazamiento vertical del elemento real debido al peso propio.

El desplazamiento que sufre el ápice no es constante y éste varía desde 1.429mm hasta -4.132mm.

Una vez superado el anillo de seguridad, el desplazamiento vertical que sufren los meridianos es prácticamente constante a lo largo de los mismos y decreciente con la altura, es decir, los meridianos próximos al suelo se desplazan menos verticalmente que los más elevados.

Otro punto que se ha analizado es el incremento diametral que sufre un meridiano cualquiera, por ejemplo el meridiano número 7, que se encuentra a una altura de 16.191m. Éste coincide con la altura con el empuje del cono.

$$\Delta\phi = \frac{\phi_f - \phi_i}{\phi_i} \cdot 100 = 0.0126\%$$

Se puede observar que en ese meridiano apenas se produce variación diametral respecto al original y la que sufre es positiva, por tanto tiende a expandirse.

En cuanto a las tensiones axiales que sufre la estructura, no se pueden calcular directamente, hay que crear una tabla, utilizando el comando LS,1 y LS,6 para calcular

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

la tensión que producen los axiles en los nodos “i” y “j” de cada elemento, tal y como se indican en las características del BEAM 44, para posteriormente mediante un comando encontrar el valor máximo de los dos. Con lo anterior, se han calculado las tensiones axiales a las que está sometida la estructura como se ve en la figura 31:

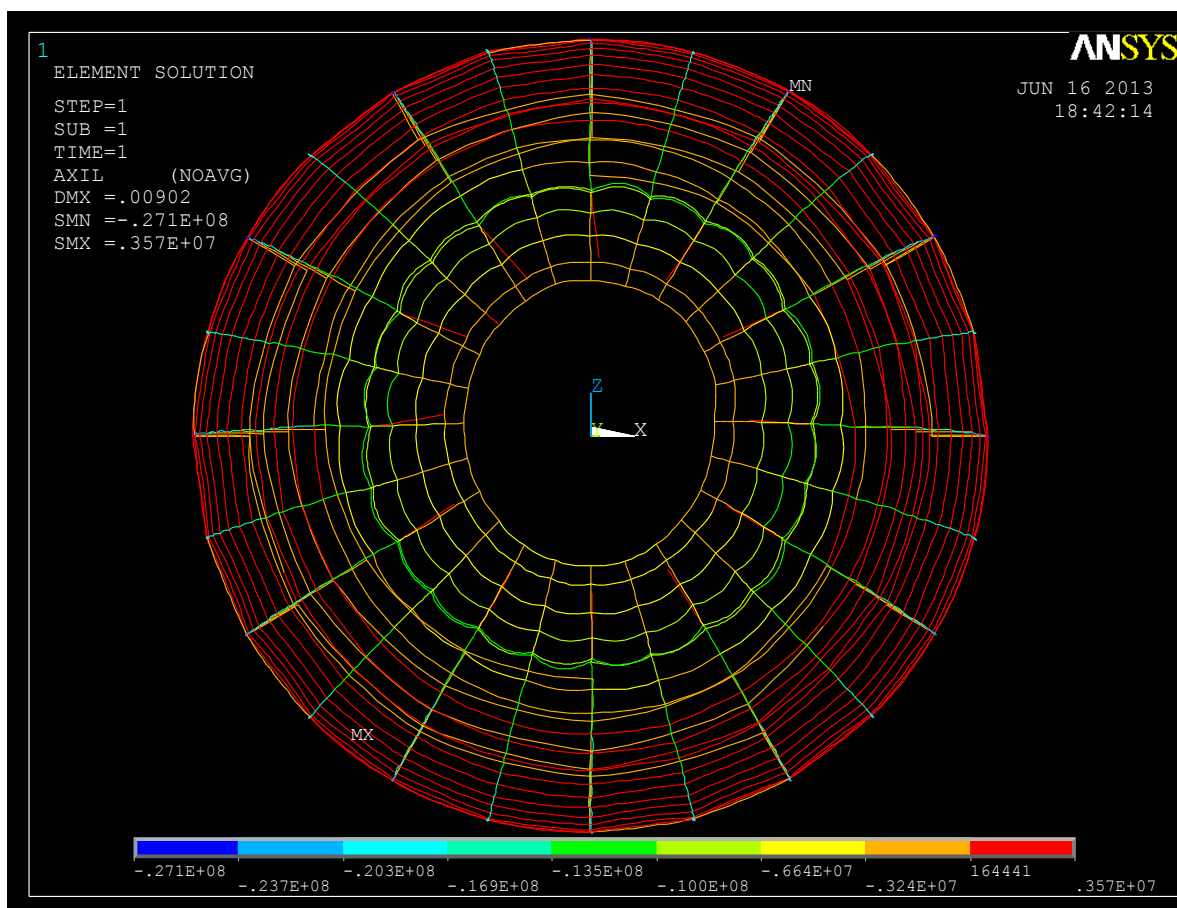


Figura 31. Tensión axial del elemento real debida al peso propio.

En la vista en planta se ve que las tensiones axiales a los que están sometido cada anillo son constantes. Para ver la evolución que sufren dentro de la estructura se ha creado una grafica en función de la altura del anillo.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

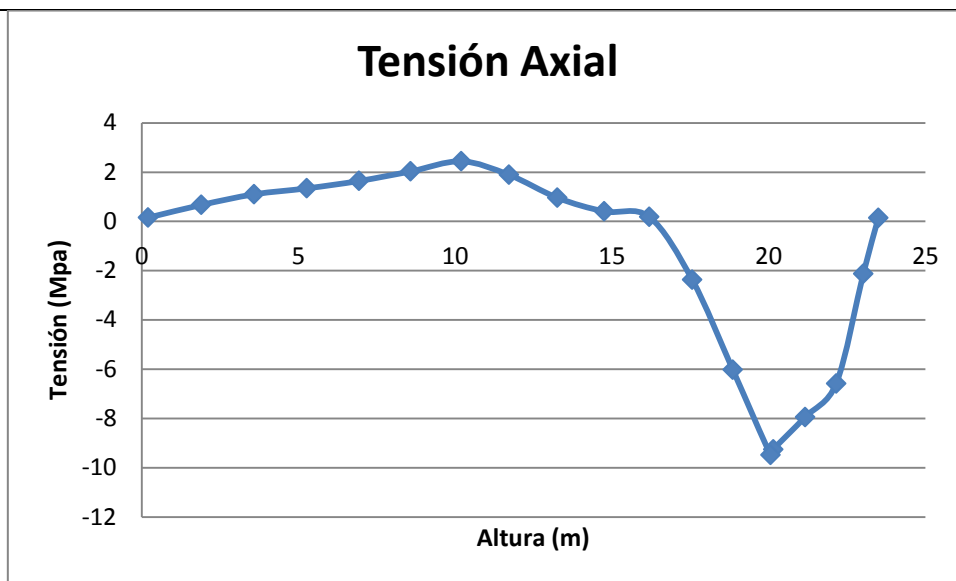


Figura 32. Variación de tensión axial del elemento real debida al peso propio

Esta grafica que nos sale, describe fielmente el comportamiento esperado de la estructura. En alturas cercanas al suelo se producen tensiones de tracción, éstas van aumentando hasta llegar a la altura media de la estructura para decrecer llegando a valores de compresión máximos en el anillo de seguridad y el meridiano 4. Es lógico que se produzca este pico ya que estos puntos se encuentran muy próximos y frenan el movimiento de la estructura.

Del mismo modo que para estudiar los anillos nos hemos fijado en la tensión que producen los axiles, para las costillas nos centraremos en los momentos flectores.

En concreto, se mirará en momento flector en el eje Z, ya que la costilla elegida para el estudio es la que se sitúa sobre el eje x.

La distribución de momentos flectores en z es la siguiente:

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

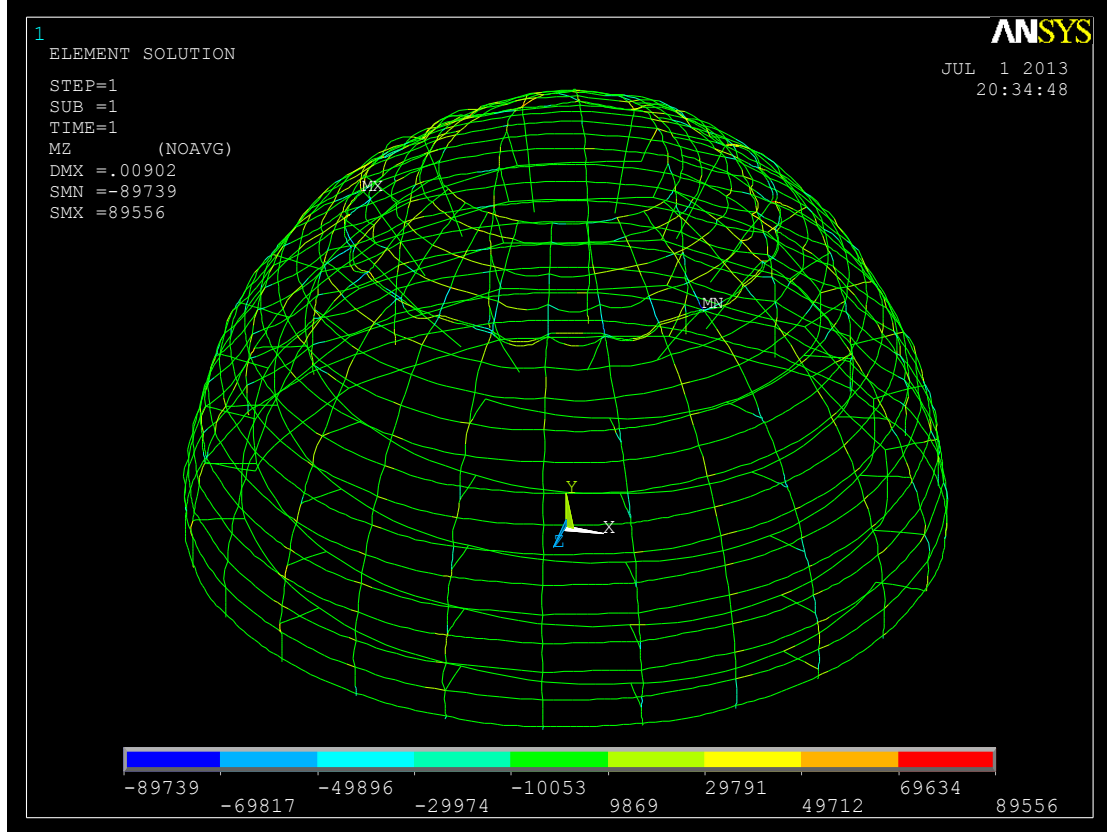


Figura 33. Distribución de momentos flectores en el elemento real debido a peso propio.

Debido a la gama de colores que se ve en la figura, no es posible apreciar cómo es la distribución de momentos flectores, así que se ha realizado una grafica en la cual se puede ver cómo varían en la costilla elegida anteriormente con la altura.

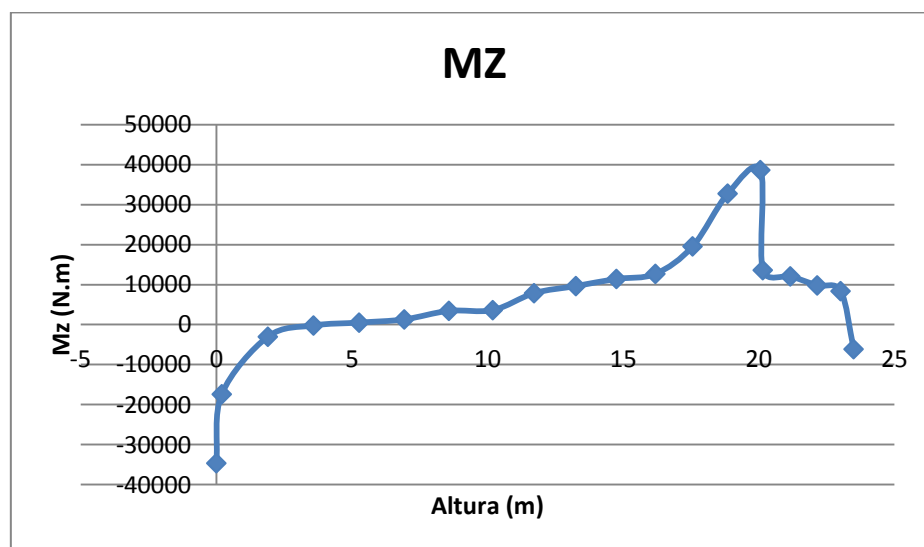


Figura 34. Variación de momentos flectores en el elemento real debida al peso propio en una costilla.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución de momentos flectores en alturas iniciales es negativa hasta que se produce un punto de inflexión en el meridiano 13. A partir de ahí, toda la estructura solamente tiene valores positivos produciéndose un repunte en el meridiano 4, que es el que se sitúa más próximo al anillo de seguridad, para a partir de ahí decrecer hasta llegar a tener un valor negativo en el anillo superior.

Como último punto a analizar se ha decidido escoger la tensión máxima que sufre la estructura. Ésta se ha obtenido utilizando el comando NMISC.

En la figura 35 se ve la distribución de tensiones máximas.

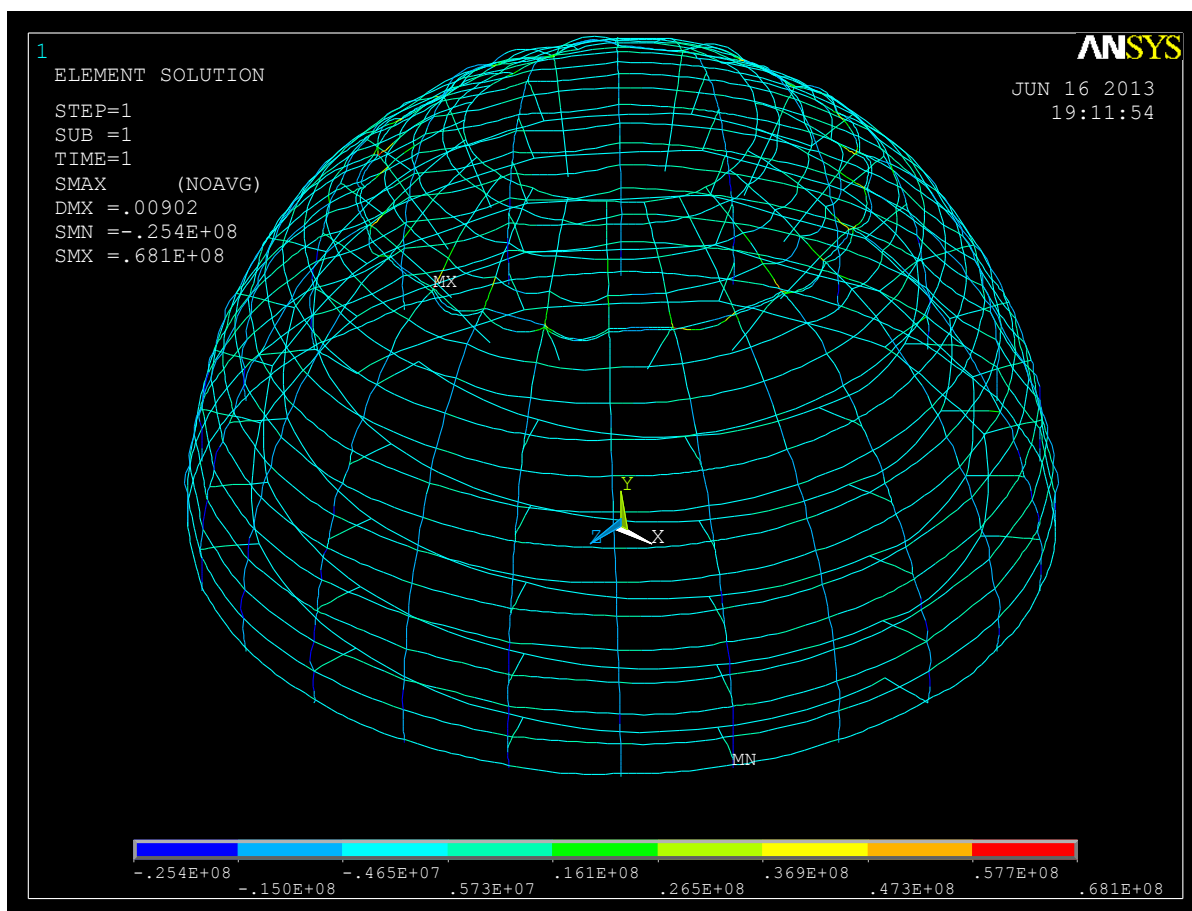


Figura 35. Tensión máxima del elemento real debida al peso propio

Para analizar cómo se comporta la tensión, se ha escogido una costilla que no tenga ningún enganche de la rampa y se ha creado un grafico que muestra el valor en función de la altura.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

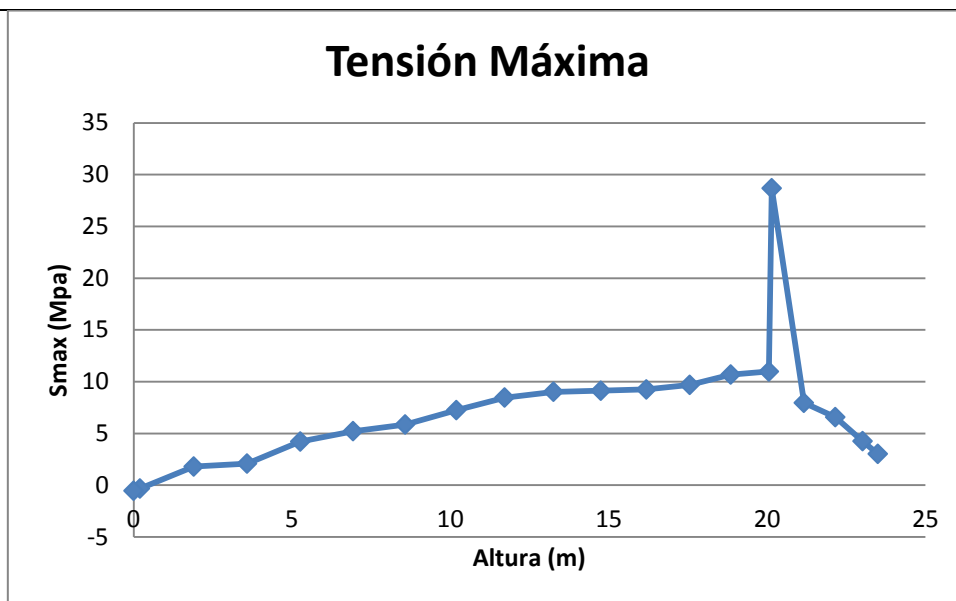


Figura 36. Variación de la tensión máxima del elemento real debido a peso propio en una costilla

La tensión va creciendo progresivamente hasta llegar al anillo de seguridad que incrementa su valor de un modo muy significativo debido a que sobre él va directamente aplicado el peso del cono. Después decrece hasta llegar a un valor cercano a cero.

3.1.1.2. Temperatura.

La carga de la temperatura solamente se aplica a la superficie exterior de la cúpula, es decir, a las secciones correspondientes al anillo superior, los meridianos y las costillas. Por consiguiente, se obtiene la siguiente deformada:

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

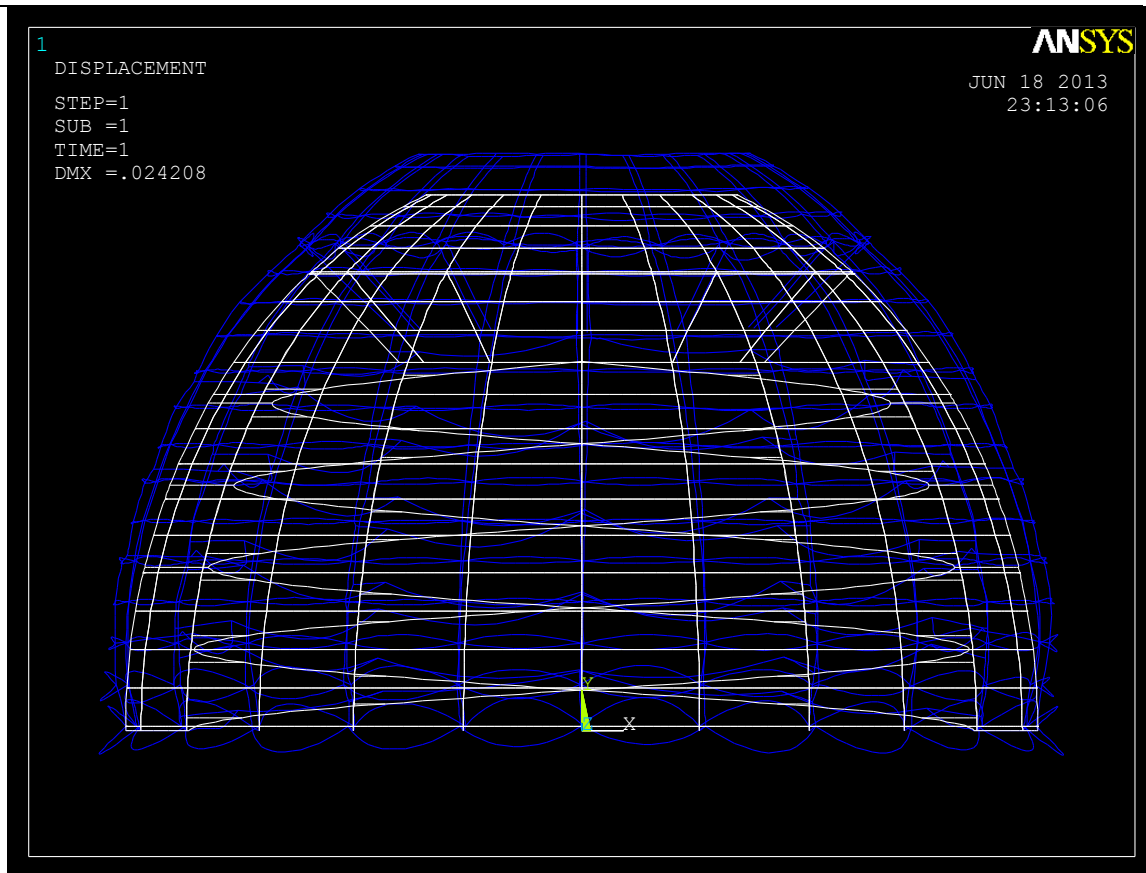


Figura 37. Deformada del elemento real debida a la temperatura.

Como cabría esperar al aplicar una carga de temperatura a un arco, éste se dilata produciendo un incremento en su altura. Para cuantificar este incremento, esta la siguiente figura en la que se muestran los desplazamientos en el eje vertical.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

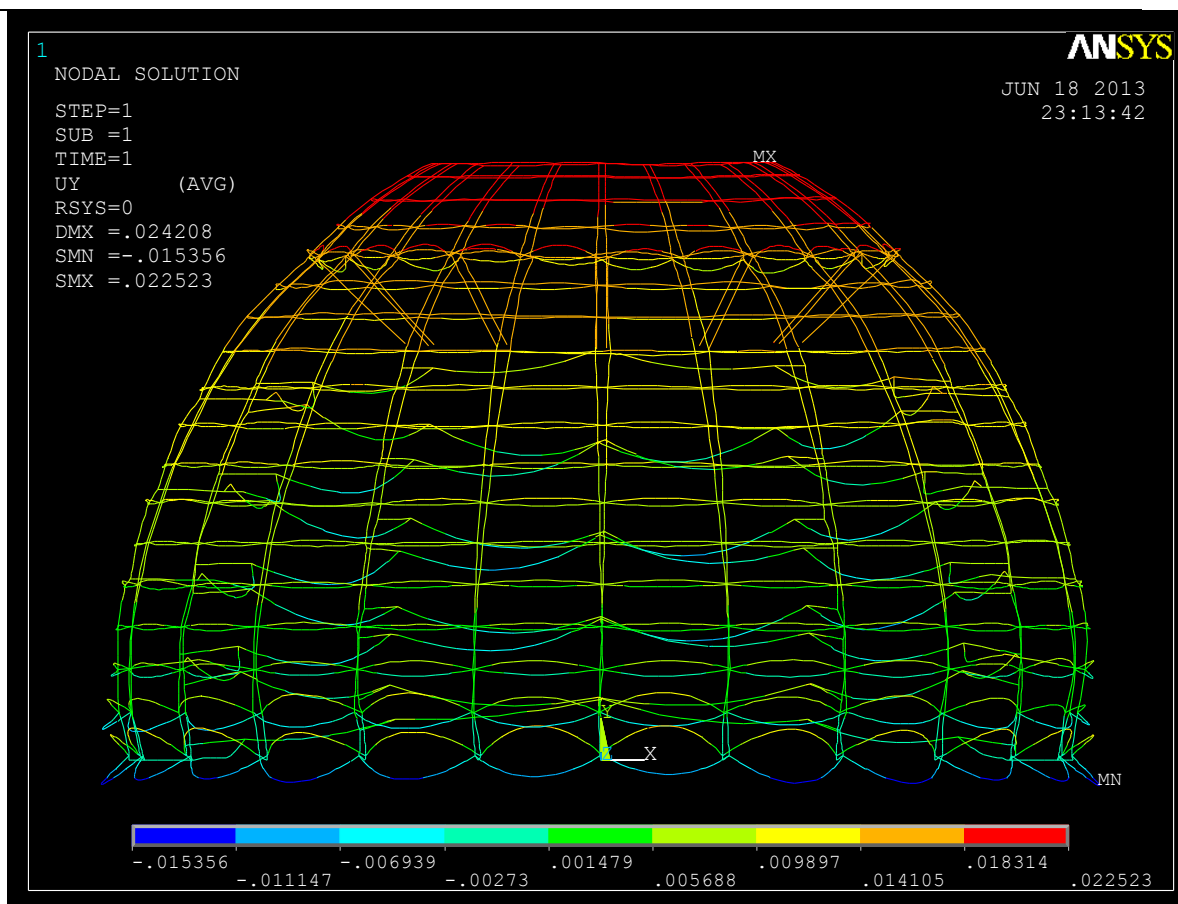


Figura 38. Desplazamiento vertical del elemento real debido a la temperatura.

Consultando la lista donde se muestran los desplazamientos nodales, se obtiene que el desplazamiento en el ápice resulta de +20.08mm.

Las pasarelas apenas sufren decrementos en su altura debido a la temperatura, como máximo, sufren una merma de 6mm.

Es curioso como el meridiano 17, que se encuentra a una altura de 0.2 m. no se deforma de manera uniforme en todos sus puntos. En unos se levanta y en otros disminuye su altura.

La estructura se comporta en este caso de manera simétrica, ya que el elemento problemático no está sometido a cargas.

Si nos fijamos en el meridiano número 7, se observa que el incremento diametral que sufre es:

$$\Delta\phi = \frac{\phi_f - \phi_i}{\phi_i} \cdot 100 = 0.0672\%$$

Este incremento es positivo, produciéndose una dilatación en el meridiano.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En relación a las tensiones axiales que sufre la estructura, se observa en la figura 39, como todos los anillos sufren tensiones de compresión excepto el meridiano 4, que se encuentra muy próximo al anillo de seguridad, que está sometido a tracción.

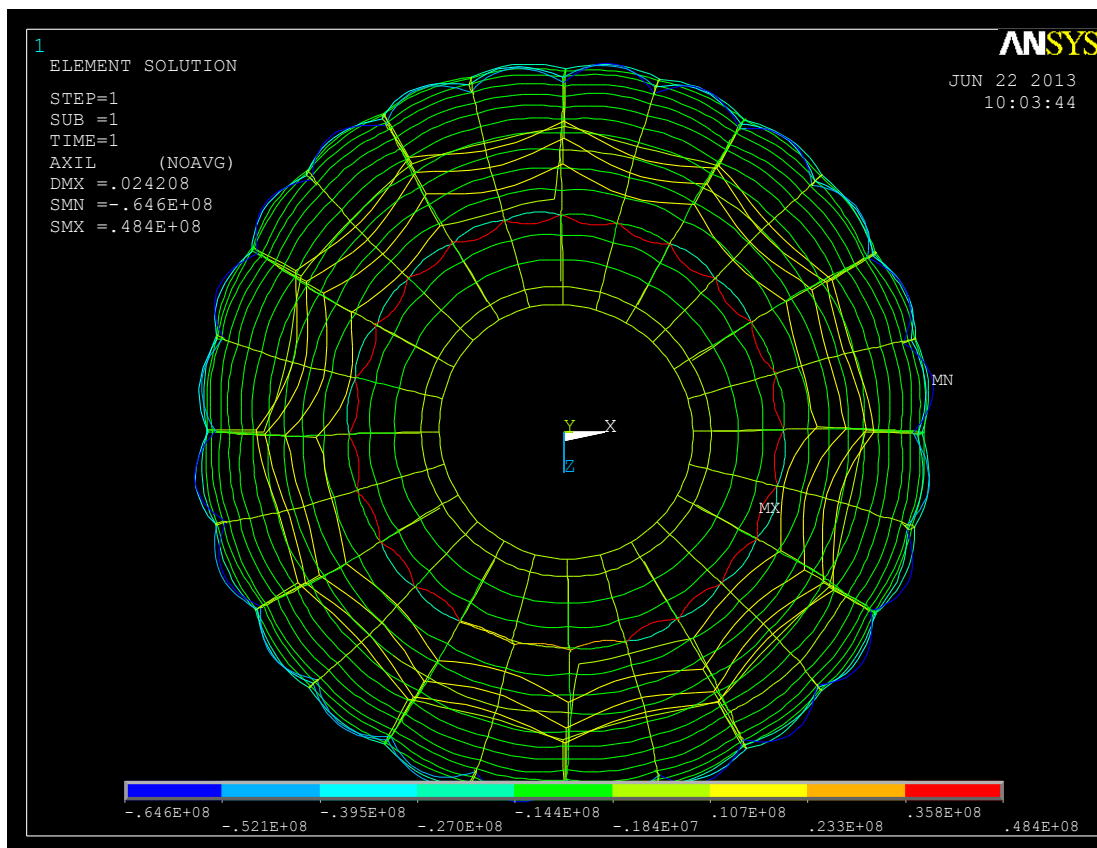


Figura 39. Tensión axial del elemento real debida a la temperatura.

En esta grafica se ilustra como varía la tensión axial en los meridianos en función de cómo incrementan con su altura

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

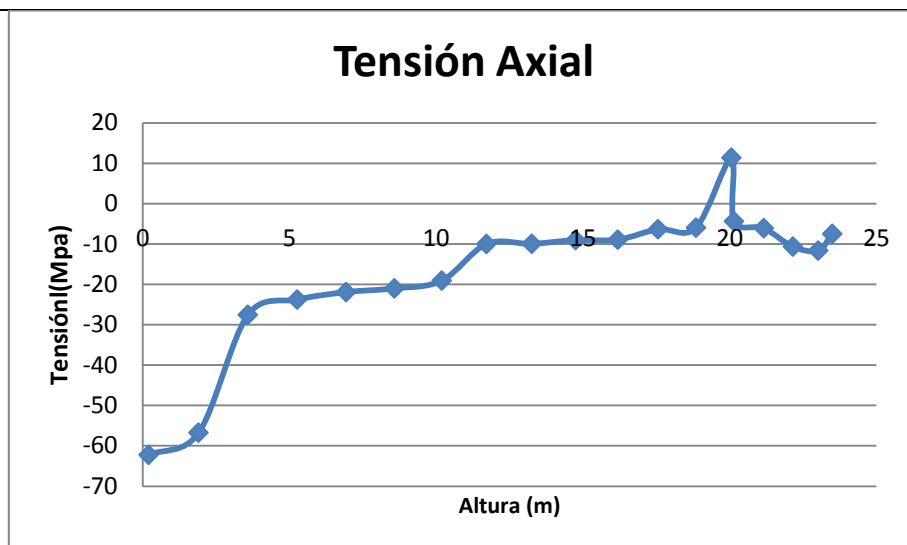


Figura 40. Variación de tensión axial del elemento real debida a la temperatura.

En la siguiente distribución, se ve como a medida que se incrementa la altura, la tensión que produce el axil va evolucionando desde valores de compresión a tracción produciéndose el incremento mayor cuando pasa del meridiano 16 al 15. Esto viene acorde con lo que se ve a la figura anterior ya que los meridianos más cercanos al suelo, el 16 y 17, son los que se deforman más, por tanto es lógico el salto que se produce.

Los momentos flectores en el eje z que sufre la estructura son los siguientes:

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

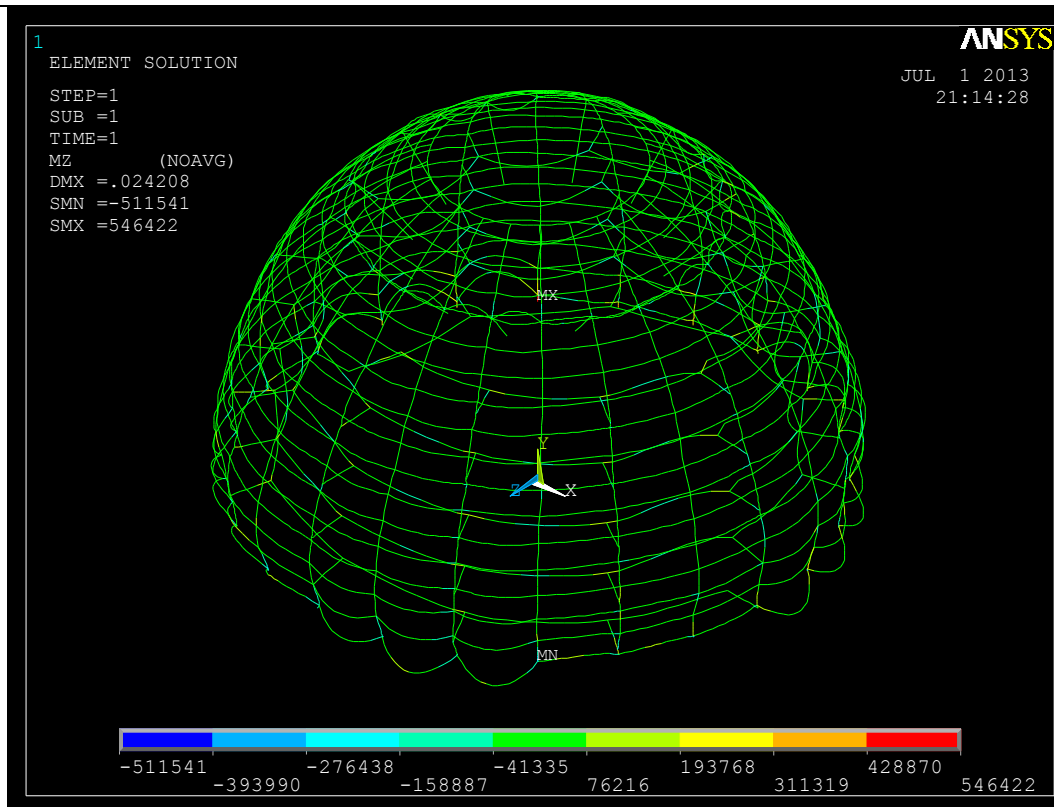


Figura 41. Distribución de momentos flectores en el elemento real debido a la temperatura.

Como sucede en el apartado anterior, también se ha elegido la costilla que se eleva sobre el eje x para estudiarla detenidamente, ya que la gama cromática que posee la figura no permite distinguir los valores.

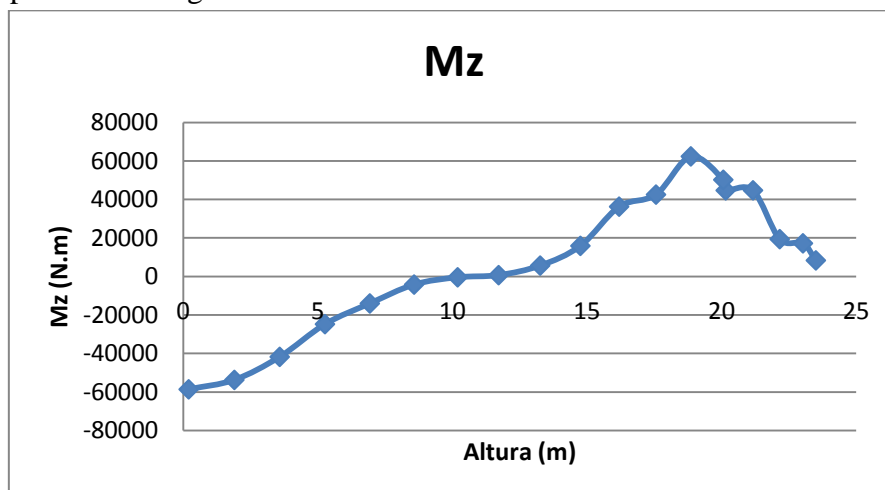


Figura 42. Variación de momentos flectores en el elemento real debido a temperatura en una costilla

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La distribución de flectores por la temperatura crece desde valores negativos de -58.5kN.m hasta 62.4kN.m, produciéndose el cambio de signo en el meridiano 11. Después decrece progresivamente pero siempre en valores positivos.

En la figura de a continuación, se puede observar la distribución de la tensión máxima a lo largo de toda la estructura:

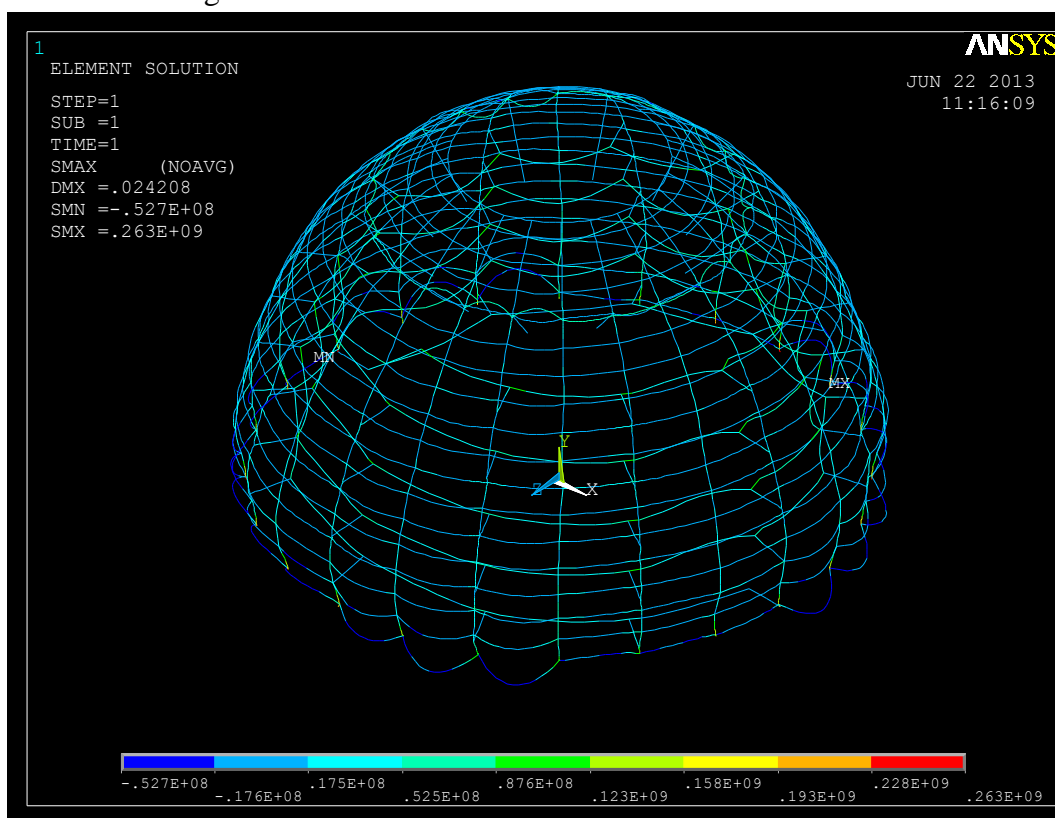


Figura 43. Tensión máxima del elemento real debida a la temperatura

Para estudiar la tensión máxima se ha escogido una costilla en la que no estén enganchadas las rampas de la estructura y es ella se pueden ver la siguiente distribución de la misma.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

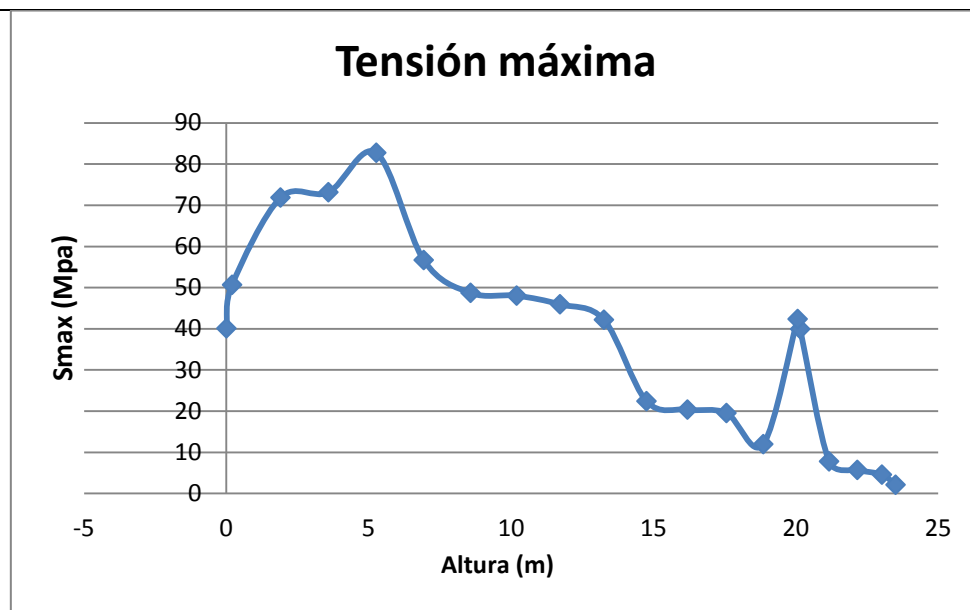


Figura 44. Variación de la tensión máxima del elemento real debido a la temperatura en una costilla

Como se observa en la tabla la tensión máxima aumenta hasta el meridiano 5 para posteriormente decrecer con la excepción que sufre el anillo de seguridad. El pico que se produce en éste viene debido a que esa sección es interior, por tanto no está sometida a temperatura y tiende a frenar las dilataciones que se producen en los otros elementos tensionándose más.

3.1.1.3 Viento.

En el caso de la carga del viento se ha supuesto que éste sopla desde un lateral en dirección del eje x. Por tanto, al ver la deformada que se muestra en la figura 45, se observa que ésta no es simétrica y esto es debido a que la carga no lo es.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

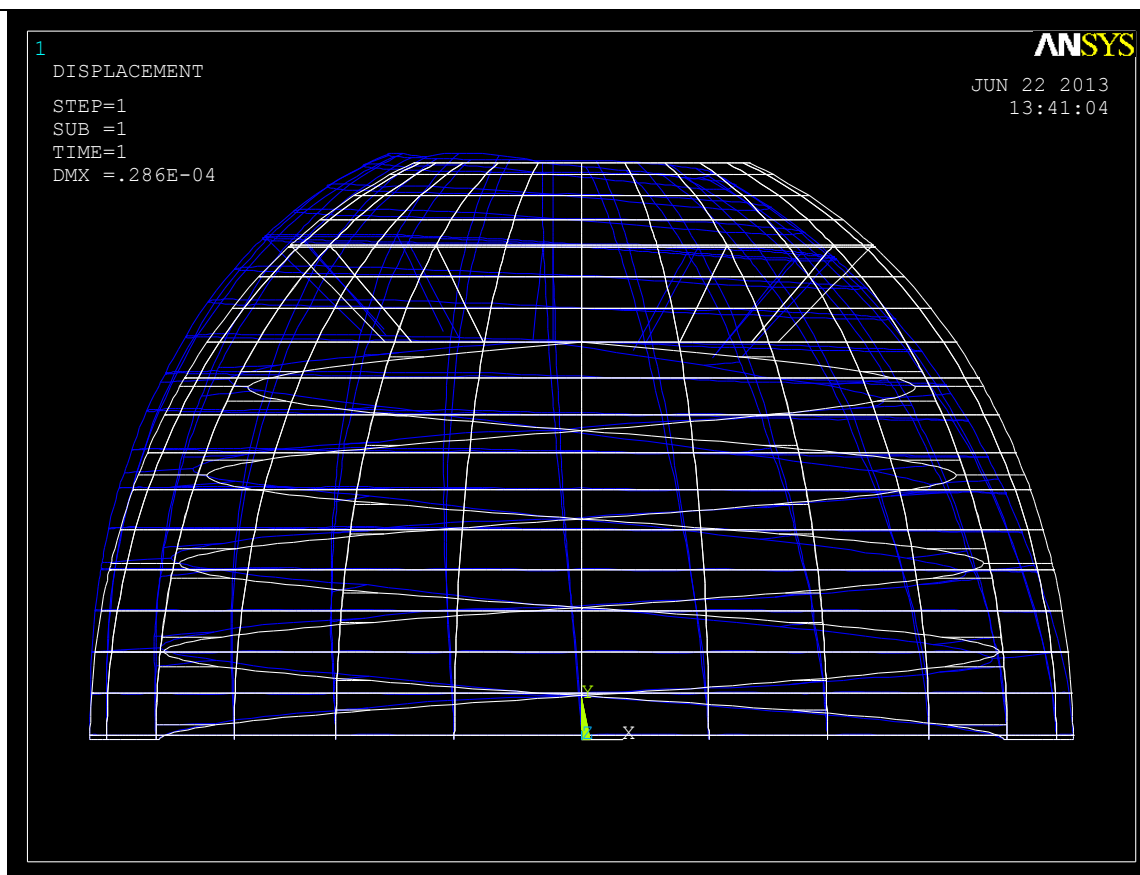


Figura 45. Deformada del elemento real por el viento.

En el ápice la flecha no es constante, ésta varía de -0.00721 a 0.00643 mm. Es una variación muy pequeña que apenas resulta significativa.

En la figura 46 se muestran los desplazamientos verticales que sufre la estructura.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

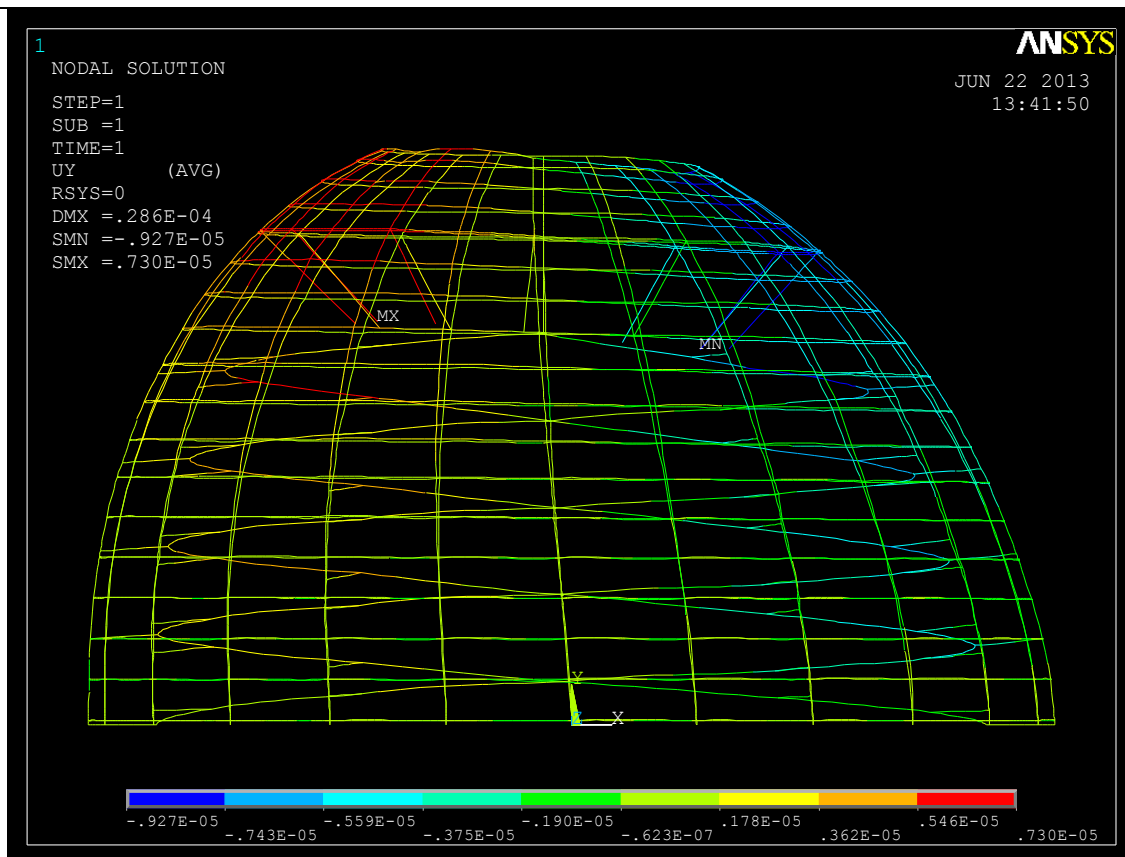


Figura 46. Desplazamiento vertical del elemento real debido al viento.

Como se ha hecho en los apartados anteriores se ha escogido el meridiano 7 para analizar como varía el diámetro de éste.

$$\Delta\phi = \frac{\phi_f - \phi_i}{\phi_i} \cdot 100 = -0.0000246\%$$

En éste caso el diámetro se comprime y reduce en una proporción muy pequeña su diámetro.

En las figuras que se muestran a continuación se van a reflejar los esfuerzos axiales, la distribución de momentos flectores según el eje z y la tensión máxima a la que está sometida la estructura.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

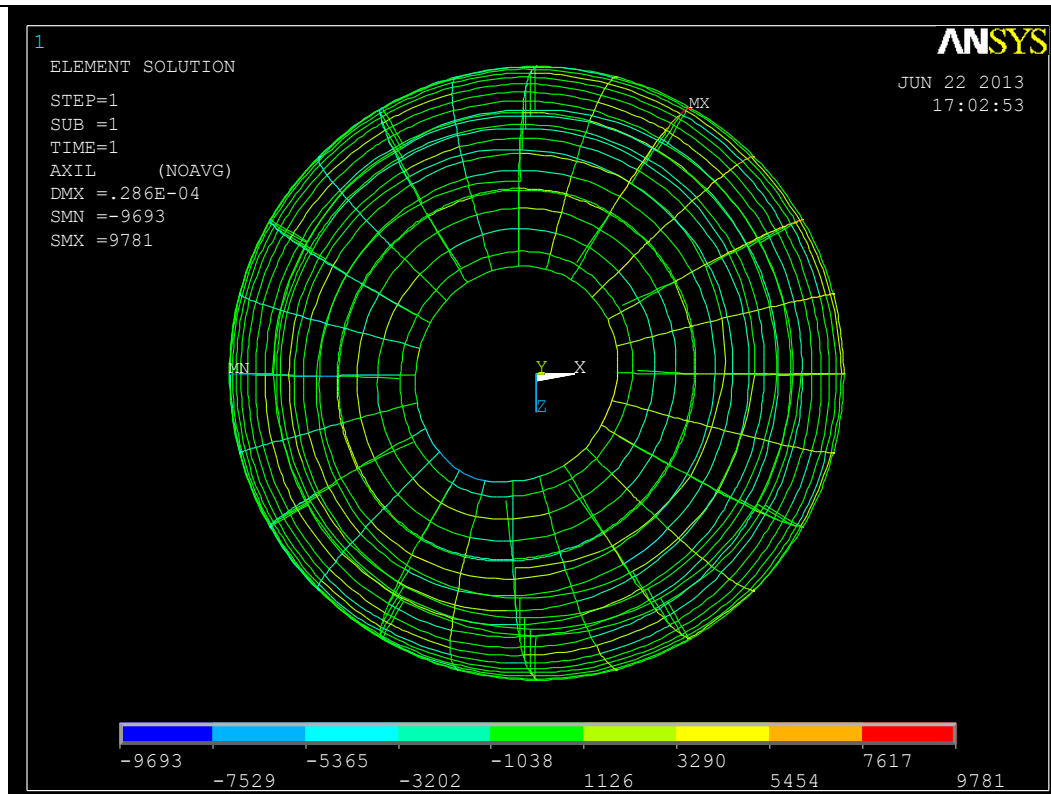


Figura 47. Tensión axial del elemento real debido al viento.

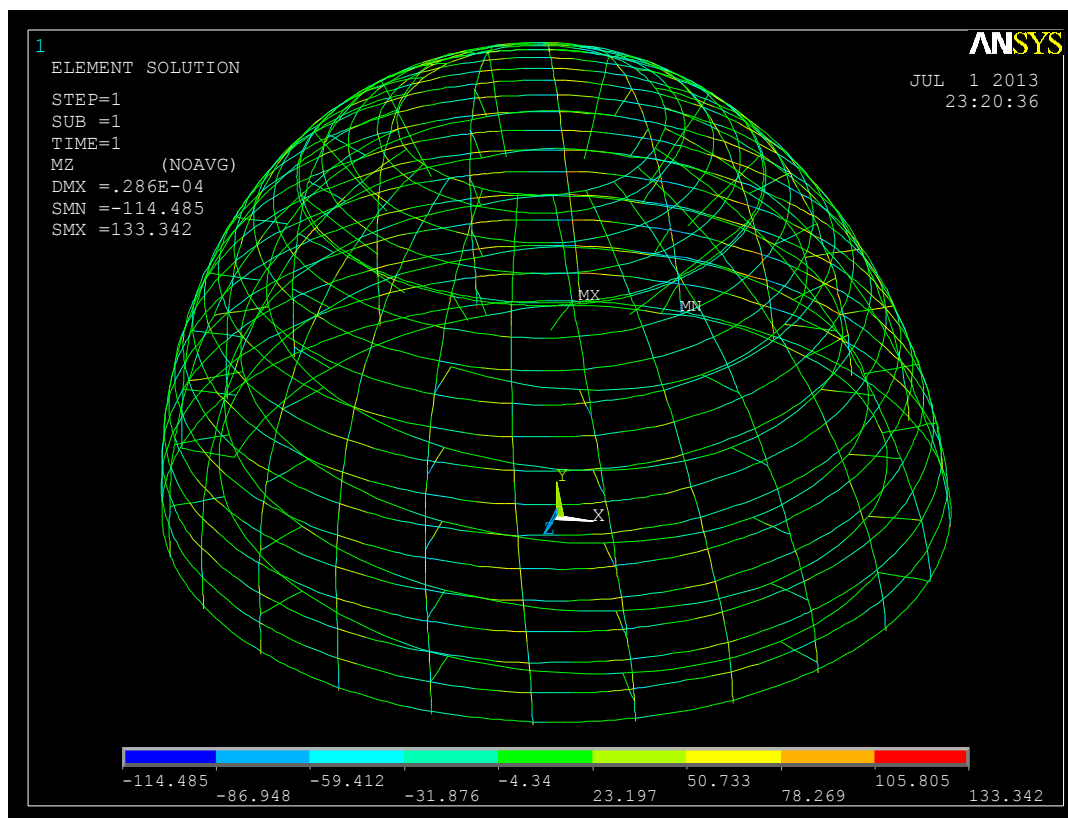


Figura 48. Distribución de momentos flectores en el elemento real debido al viento.

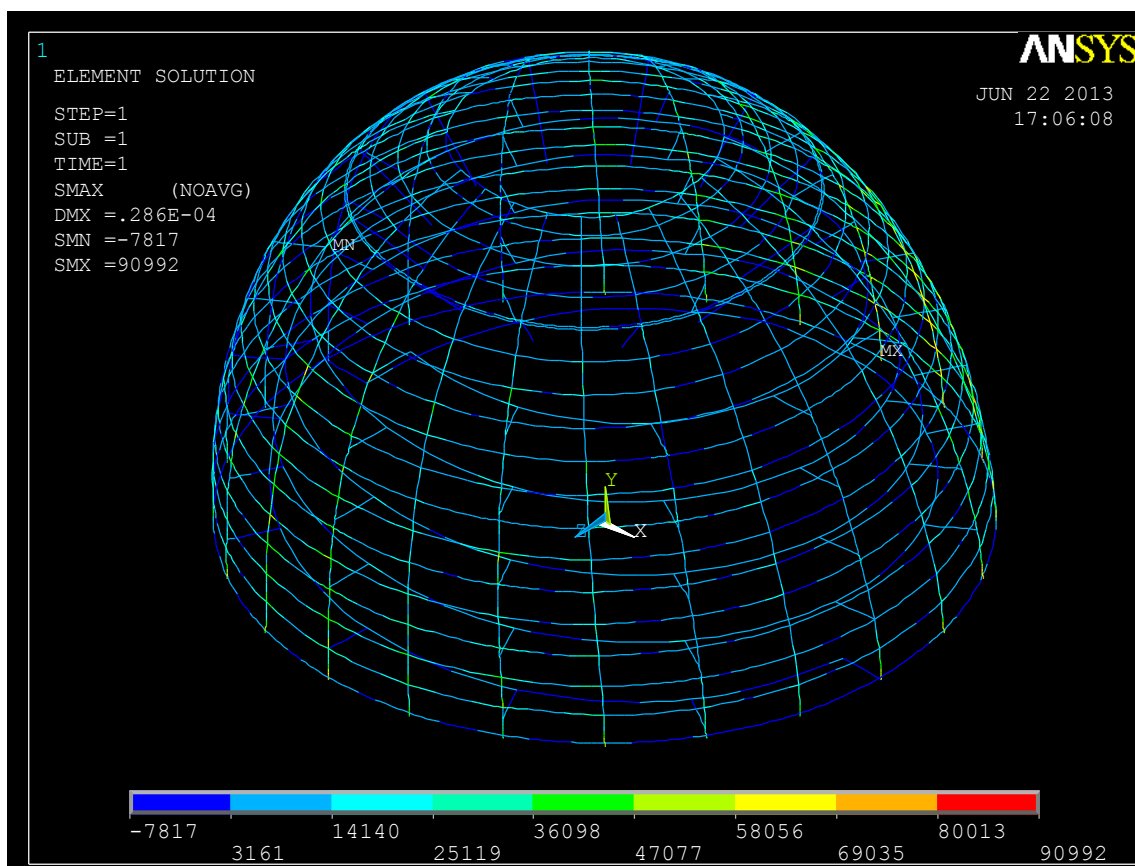


Figura 49. Tensión máxima del elemento real debida al viento.

En las tres figuras anteriores no se ha analizado en profundidad como varían las tensiones o los momentos en función de la altura, porque sus valores son muy pequeños en comparación con los de las otras dos hipótesis elementales.

3.1.1.4. Comparación del efecto de las hipótesis elementales en la cúpula real.

El objetivo de este apartado es analizar lo que supone cada hipótesis en el conjunto global de la estructura, es decir, el peso propio, la temperatura y el viento en la estructura original.

- Deformada:

Tanto en el peso propio como en el viento, ésta no es simétrica sufriendo un repunte en uno de los extremos de la cúpula. En ambas coincide el mismo lado por la dirección del viento que se ha supuesto. También hay que destacar que la estructura

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

excepto en puntos aislados tiende a disminuir su altura, siendo mucho menor la variación en el caso del viento.

En el caso de la temperatura, la deformada es simétrica, y en todos sus puntos tiende a dilatar la estructura e incrementar su altura. Resulta muy interesante ver como se deforman los últimos meridianos ya que tienden a formar una especie de pétalos de flor, aumentando y disminuyendo su altura.

- Flecha en el ápice de la cúpula:

En la siguiente tabla se muestra lo que varía la flecha en el ápice:

Hipótesis elemental	Flecha (mm)
Peso propio	-4.132 a 1.429
Temperatura	20.08
Viento	-0.00721 a 0.00643

Tabla 13. Flecha en el ápice de las hipótesis elementales de la cúpula real.

En esta tabla, se observa que la carga que más afecta a estructura en este ámbito, es sin duda la temperatura, siendo como mínimo cinco veces mayor, a la siguiente hipótesis más desfavorable.

- Incremento diametral de un meridiano:

Se ha escogido para realizar este análisis el meridiano 7, que coincide justo con el empuje del cono, que se encuentra a 16.191 metros de altura.

Hipótesis elemental	Incremento diametral
Peso propio	0.0126%
Temperatura	0.0672%
Viento	-0.0000246%

Tabla 14. Variación diametral de las hipótesis elementales de la cúpula real.

En el peso propio y en la temperatura aumentan su diámetro, mientras que con el viento se reduce muy ligeramente, ya que prácticamente es inapreciable.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Tensión axial:

Para realizar el estudio de las tensiones axiales, nos hemos centrado en los anillos de la estructura para ver como varían con la altura.

Tanto para el peso propio como para la temperatura se ha creado unas gráficas donde se observa está variación en función de la altura. En el caso del viento no se ha realizado por que los valores que aporta son despreciables en función a los dos anteriores.

En el peso propio, las tensiones axiales son de tracción hasta en meridiano 7, que es donde se produce el cambio de signo. Del 17 hasta el 11 van aumentando su valor para posteriormente descender hasta el meridiano 4, donde alcanza su valor máximo de -9,481 MPa. A partir de este punto crece hasta llegar al anillo superior, en el cual toma un valor muy próximo a cero.

Respecto a la temperatura, todos los valores que toma son de compresión a excepción del meridiano 4, que se encuentra muy próximo al anillo de seguridad, el cual no ha recibido directamente la carga de temperatura por ser un elemento interior. La tensión axial crece progresivamente desde el meridiano 17 al 4 para posteriormente decrecer hasta el anillo de seguridad. El mayor valor al que está sometido se encuentra a una altura de 0.2 metros y es de -62,251 Mpa.

En general, en todos los puntos, es mucho más desfavorable la carga de temperatura que la del peso propio y sobretodo que la del viento.

- Momento flector

Para analizar como varían los momentos flectores dentro de la estructura, se ha elegido la costilla que se encuentra sobre la parte positiva del eje x, y se ha creado una grafica en función de cómo varía el flector con la altura en las hipótesis de carga del peso propio y de la temperatura. En el viento, la grafica no se ha realizado por que los valores eran mucho más pequeños que los de las otras hipótesis, por tanto prácticamente no afectarán.

En los dos casos estudiados la forma de la grafica muy similar. Ambas comienzan en valores negativos para crecer progresivamente hasta un máximo positivo y luego decrecer ligeramente.

El punto máximo es distinto en las dos, en la hipótesis de peso propio se encuentra en el meridiano 4, que es el que está pegado al anillo de seguridad. El anillo soporta el peso del cono, por tanto parece lógico que los puntos próximos a él flecten más que los que se encuentran más alejados. En la hipótesis de temperatura la curva

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

crece de un modo más lineal que en el caso de peso propio y el punto máximo se produce en el meridiano 5.

En el empotramiento los valores de los flectores son mayores en la temperatura que en el peso propio. A su vez, el punto de inflexión se encuentra a una altura superior en ésta que el peso.

- Tensión máxima (directa + Flexión)

Al igual que en el caso que en los casos anteriores, se han creado dos tablas, una para el peso propio y otra para la temperatura dónde se encuentra la variación de la tensión con la altura.

No se ha considerado el caso del viento por que los valores de éste son despreciables respecto a los dos supuestos anteriores.

En relación al peso propio, la tensión va aumentando progresivamente desde altura cero hasta el anillo de seguridad, el cual presenta el valor máximo de 28,68 Mpa. Produciéndose un salto muy significativo respecto al anterior y posterior. Posteriormente su valor decrece hasta el anillo superior.

En la temperatura la evolución de la tensión máxima con la altura es muy distinta a la de las cargas permanentes. Su valor máximo se da a una altura de 5.34 metros y toma un valor de 82.736 Mpa. Desde el suelo hasta este punto va incrementado su valor para a continuación descender progresivamente hasta alcanzar un valor cercano al cero, con la excepción del anillo de seguridad que incrementa su tensión.

Ambos casos tienen en común el repunte de tensión que se da en el anillo de seguridad.

A modo de pequeña conclusión al comparar todos los puntos que se han elegido para analizar en cada hipótesis, sin lugar a duda en todos ellos la carga más desfavorable ha sido siempre la temperatura seguida del peso propio y por último el viento que apenas producía ningún efecto destacable.

3.1.2. La cúpula sin rampa

Se estudiará una alteración de la estructura original en la que se eliminan los enganches y las rampas que están sujetas a ellos. Al igual que en el punto anterior, también se tratará la estructura restringiendo todos los grados de libertad de los puntos sobre el suelo.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.2.1. Peso propio.

La carga de peso propio consiste en él que aportan todas las secciones, excluyendo las pasarelas y los enganches de las mismas, el peso de la cristalera y el del cono.

Al resolver el sistema se observa cómo se deforma la estructura respecto al supuesto inicial sin rampa. En este caso al ser la estructura y las cargas simétricas, la deformada también lo es.

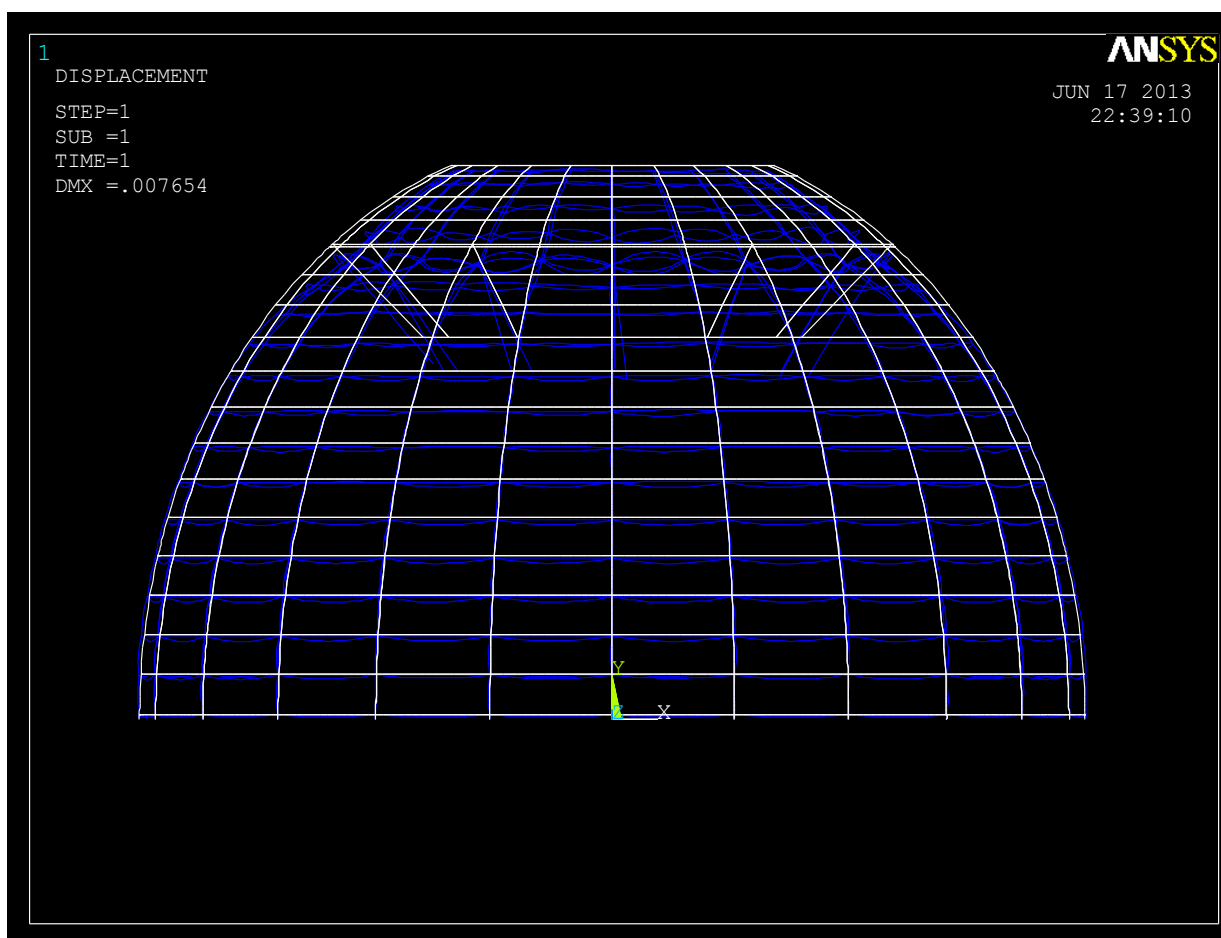


Figura 50. Deformada del elemento sin rampas debida al peso propio.

Al eliminar el objeto de discordia, la flecha en el ápice de la cúpula es constante y de valor -1.102mm como se puede observar en la figura 51.

Como parece lógico a medida que los puntos están más cercanos al suelo, el desplazamiento vertical que sufren es menor llegando a ser cero en los empotramientos.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

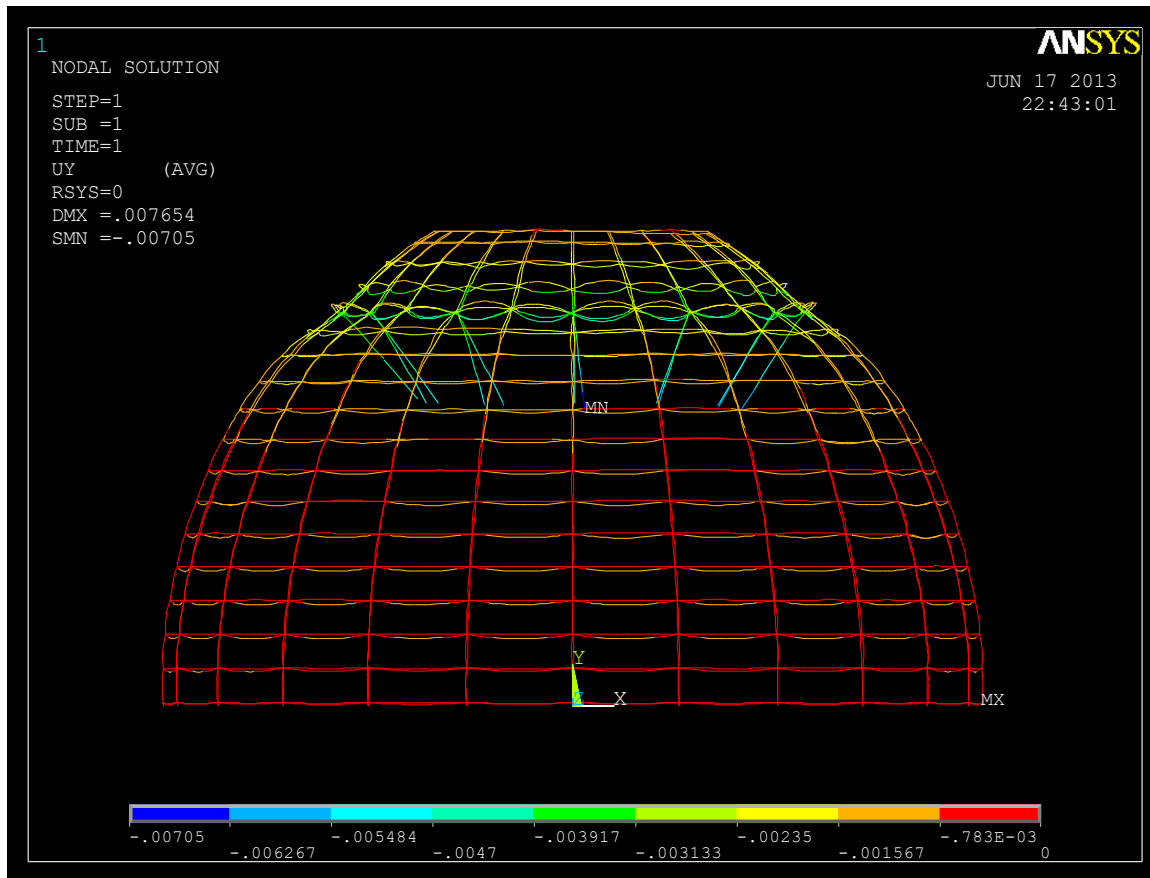


Figura 51. Desplazamiento vertical del elemento sin rampas debido al peso.

En este apartado al igual que en el anterior se va a calcular en incremento diametral de un meridiano y con objeto de poder comparar hipótesis elementales en apartados posteriores también se estudiara el número 7. Su valor es el siguiente:

$$\Delta\phi = \frac{\phi_f - \phi_i}{\phi_i} \cdot 100 = 0.00227\%$$

El incremento diametral resulta positivo, produciendo un aumento de diámetro respecto al inicial.

La tensión axial se puede ver en la siguiente figura:

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

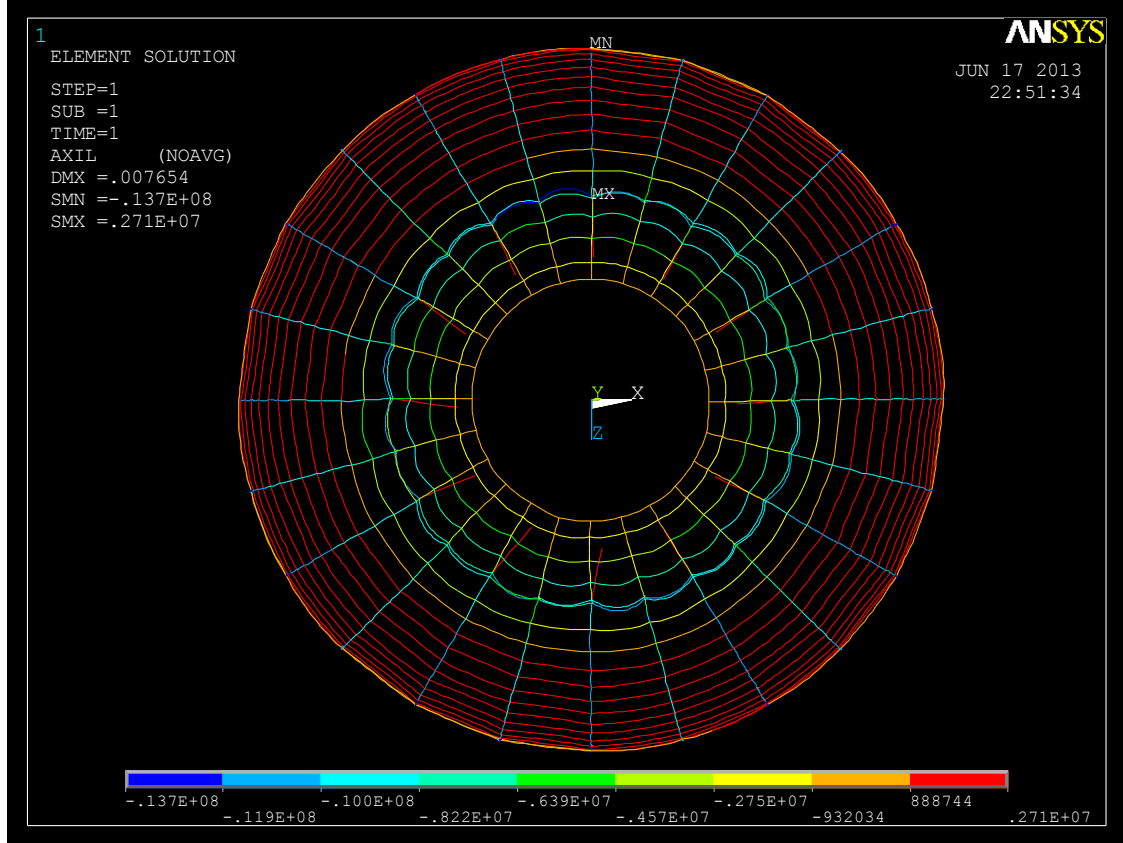


Figura 52. Tensión axial del elemento sin rampas debida al peso propio

En la gráfica de a continuación se ilustra como varía la tensión axial en función de la altura de la estructura:

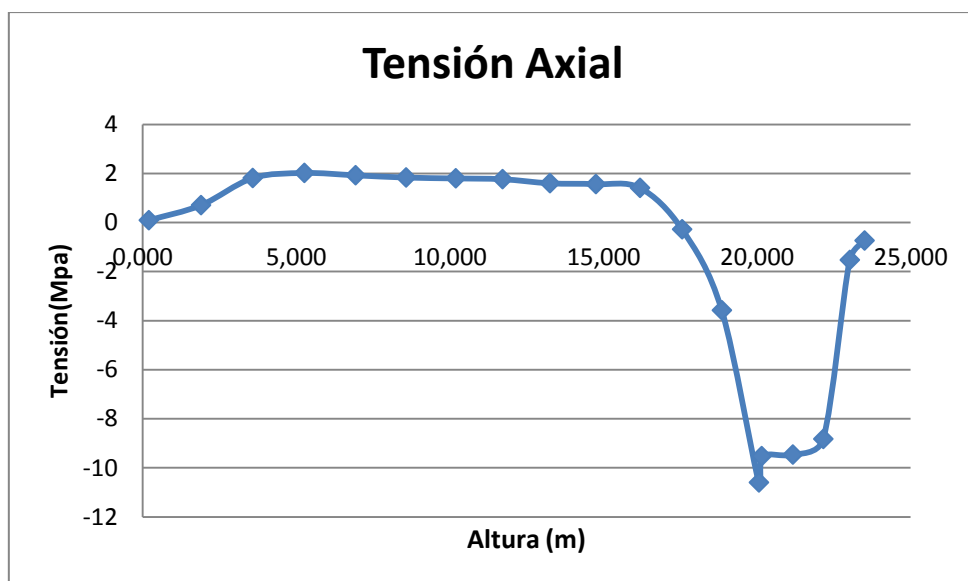


Figura 53. Variación de tensión axial del elemento sin rampas debida al peso propio

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se puede observar a partir del meridiano 7 se produce un cambio, y pasan de ser de tracción a compresión, alcanzando su valor máximo en el meridiano 4, que es el que está más próximo al anillo de seguridad.

La estructura está sometida a los siguientes momentos flectores en el eje z:

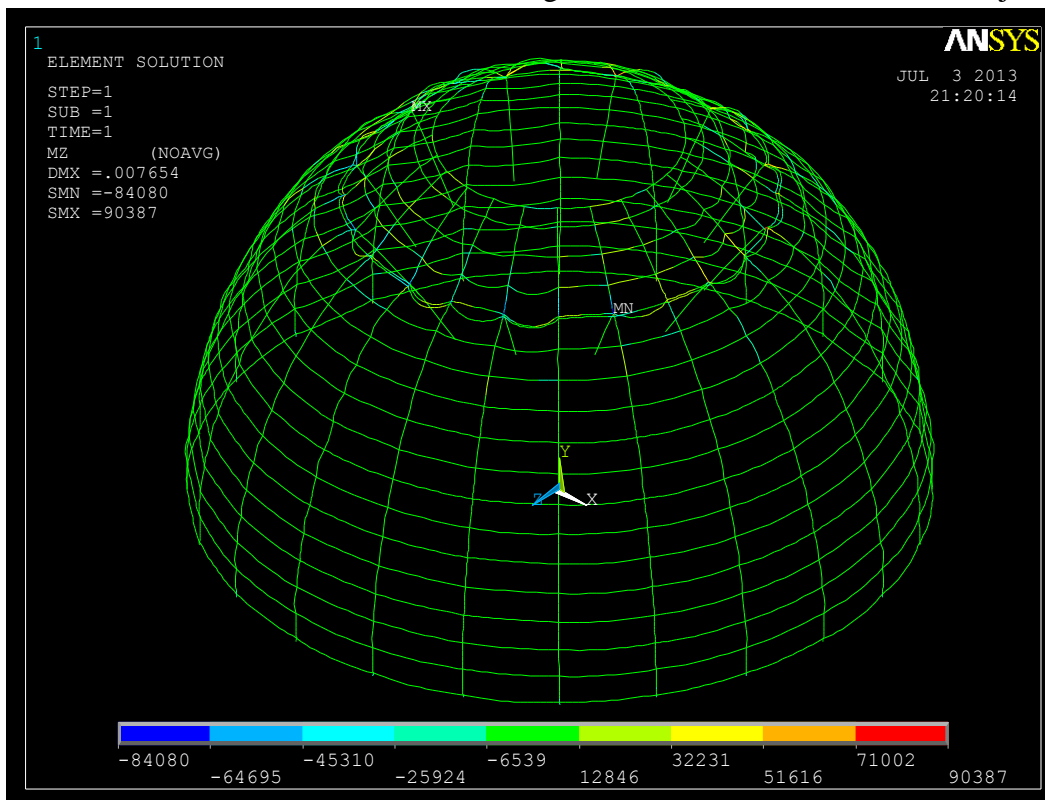


Figura 54. Distribución de momentos flectores en el elemento sin rampas debido al peso propio.

Para analizarlos los resultados se ha escogido la costilla que se encuentra sobre la parte positiva del eje x. En ella, se ha estudiado la variación del flector con la altura como se puede ver en la siguiente tabla.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

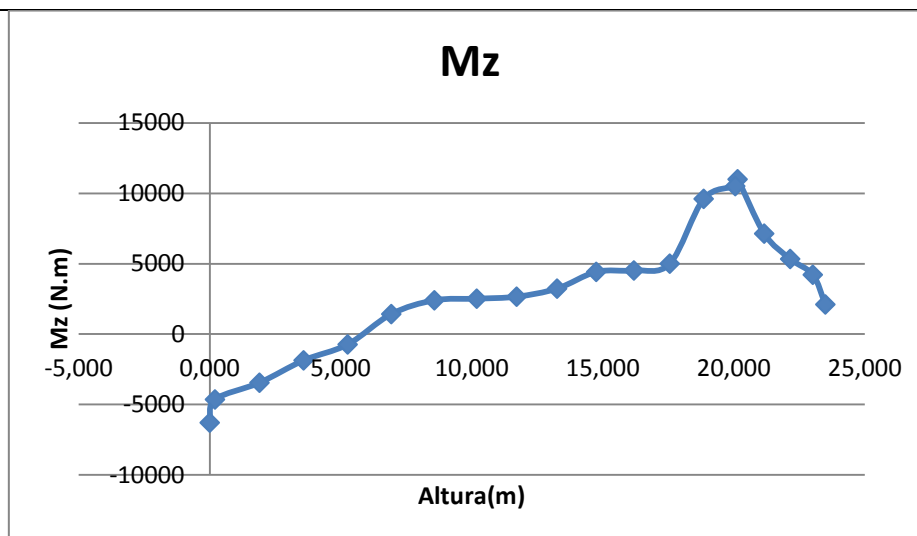


Figura 55. Variación de momentos flectores en el elemento sin rampas debido al peso propio en una costilla.

Como se puede observar, la distribución de flectores va creciendo hasta alcanzar su máximo en alturas próximas al anillo de seguridad.

En la siguiente figura se ilustran como varía la tensión máxima a la que está sometida la estructura:

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

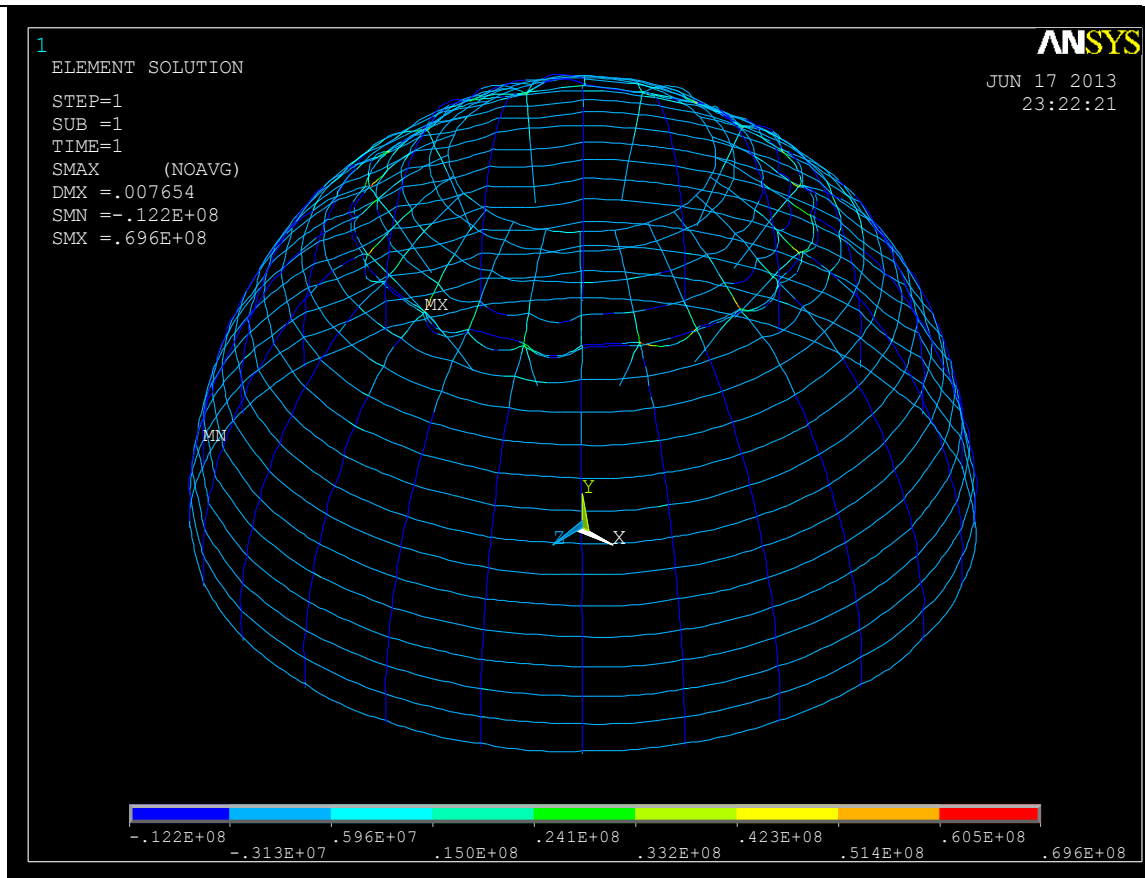


Figura 56. Tensión máxima del elemento sin rampas debida al peso propio.

Como se puede observar, las tensiones son mayores en valor absoluto en las costillas que en los meridianos. Por esta razón se ha creado la siguiente grafica donde se muestra la variación de la tensión máxima con la altura en una costilla cualquiera.

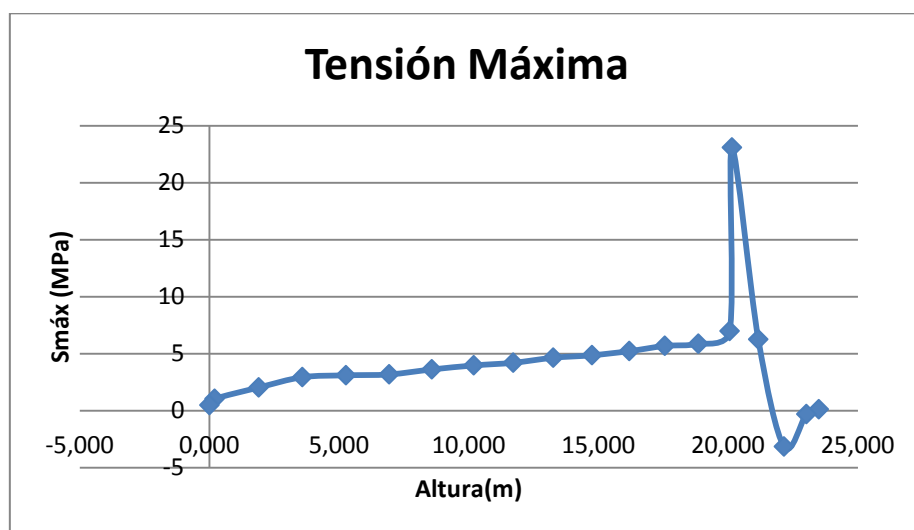


Figura 57. Variación de la tensión máxima del elemento sin rampas debido al peso propio en una costilla.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Es interesante destacar el repunte que sufre en el anillo de seguridad, éste incrementa su valor más de un 300% respecto al punto anterior y posterior.

Todos los valores son positivos a excepción del meridiano 2, que es negativo.

3.1.2.2. Temperatura.

Al igual que el supuesto del elemento original, la carga de la temperatura solamente se aplica a la superficie exterior de la cúpula. La deformada que se obtiene se muestra a continuación.

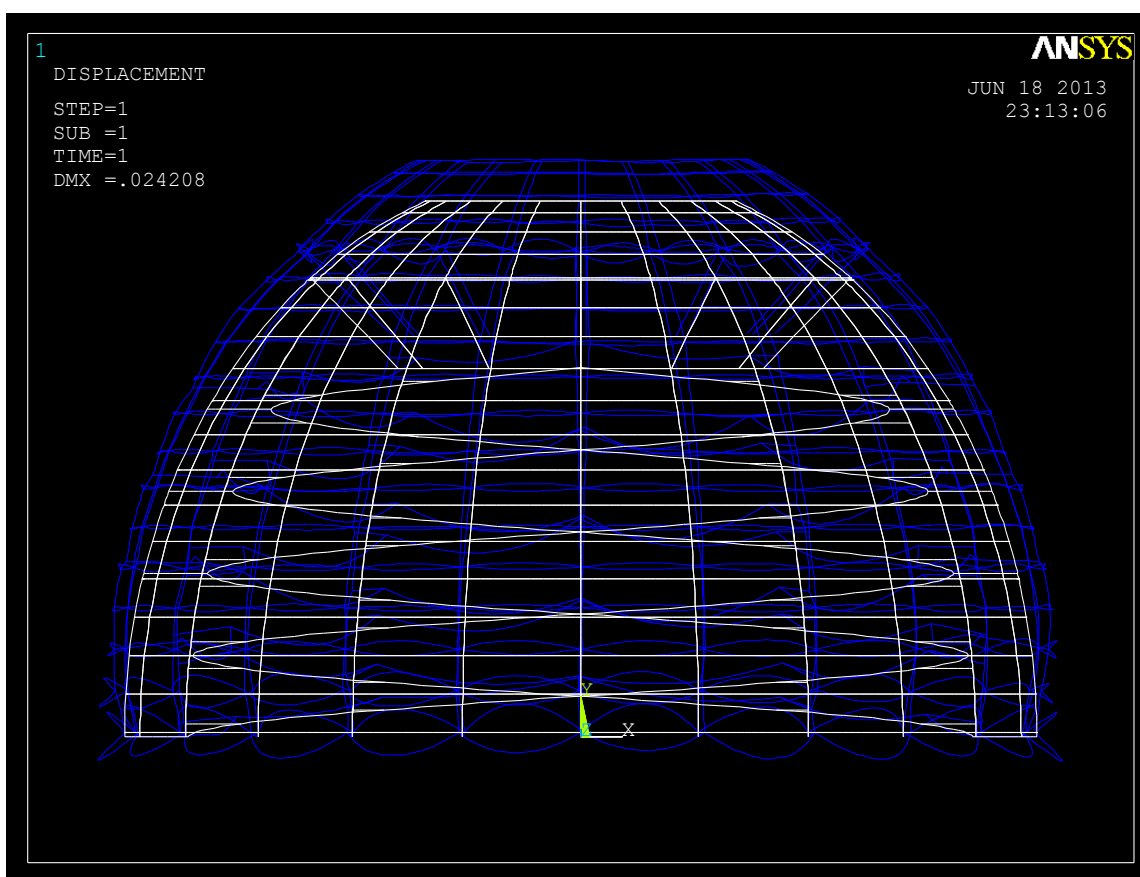


Figura 58. Deformada del elemento sin rampa debida a la temperatura.

Tal y como se observa en la deformada, la estructura se comporta de manera simétrica.

Los desplazamientos que se producen en relación al eje vertical se observan en la figura 59.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

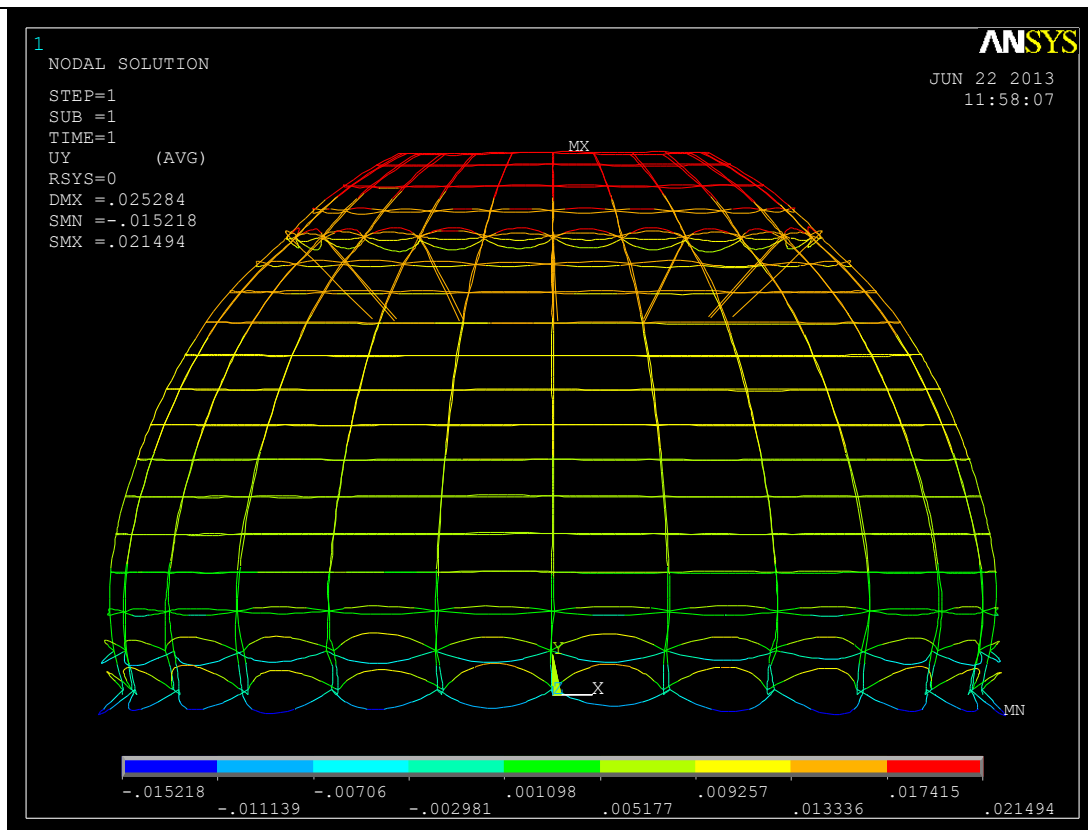


Figura 59. Desplazamiento vertical del elemento sin rampa debido a la temperatura.

El desplazamiento vertical en el ápice resulta de +19.75mm, la dilatación que sufre hace que se produzca un incremento en la altura.

Tanto el meridiano 16 como el 17, que resultan los más próximos al suelo no se deforman del mismo modo. Ambos arquean aumentando o disminuyendo su altura respecto a la posición inicial.

En el estudio del meridiano 7, se observa que el incremento diametral que sufre es:

$$\Delta\phi = \frac{\phi_f - \phi_i}{\phi_i} \cdot 100 = 0.0733\%$$

En la figura 60, se observan las tensiones axiales a las que está sometida la estructura. Todas son a compresión a excepción del meridiano 4 que está sometido a tracción.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

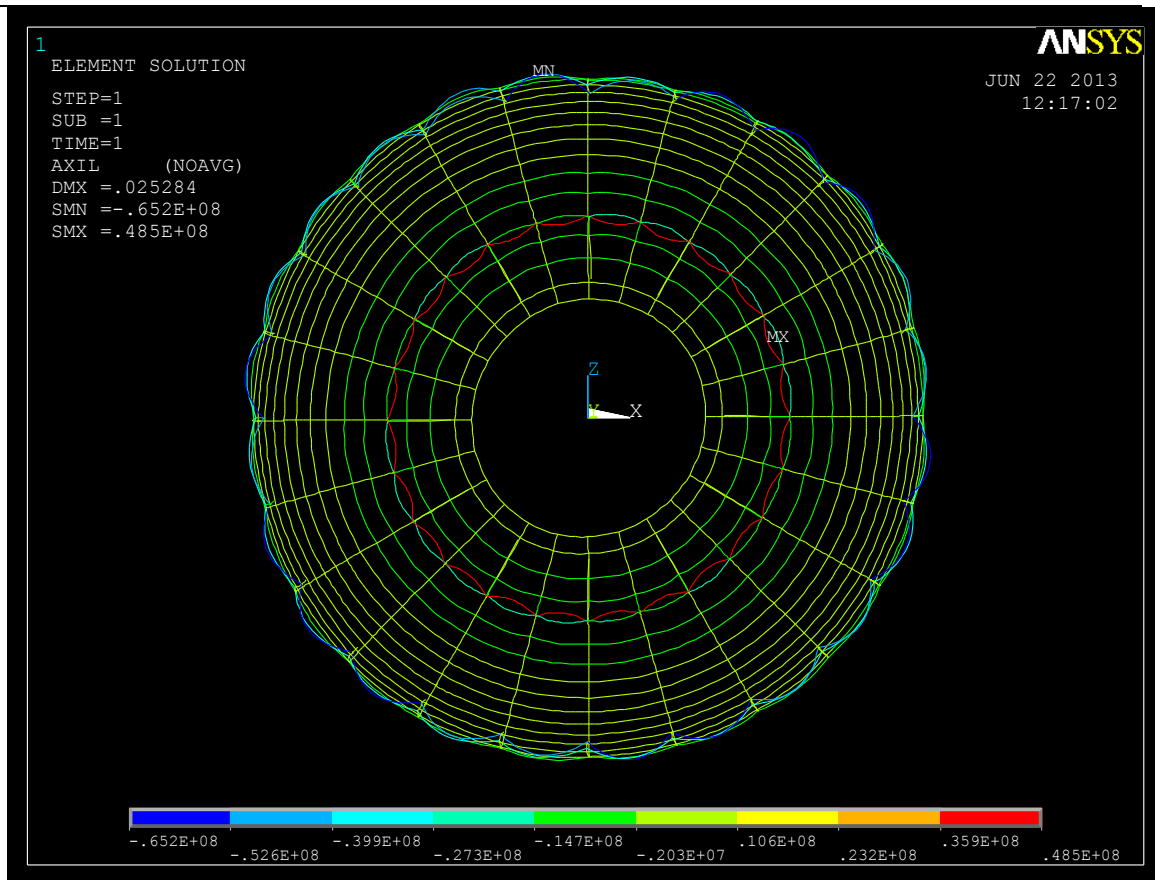


Figura 60. Tensión axial del elemento sin rampas debida a la temperatura.

En esta tabla se ilustra como varía la tensión axial en los meridianos en función de cómo incrementan con su altura.

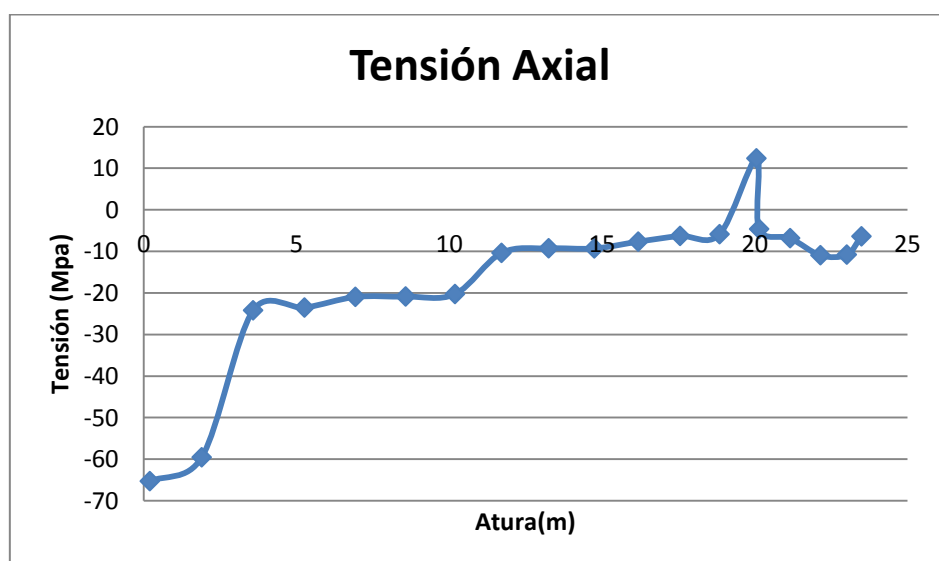


Figura 61. Variación de tensión axial del elemento sin rampas debida a la temperatura.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resulta lógico el salto que se produce del meridiano 15 al 16 solamente viendo como se deforma la estructura, ya que esos puntos están mucho más tensionados que el resto de meridianos al tener la influencia del empotramiento cercana.

Para ver cómo afecta los momentos flectores a la estructura se ha sacado la distribución de flectores en el eje z

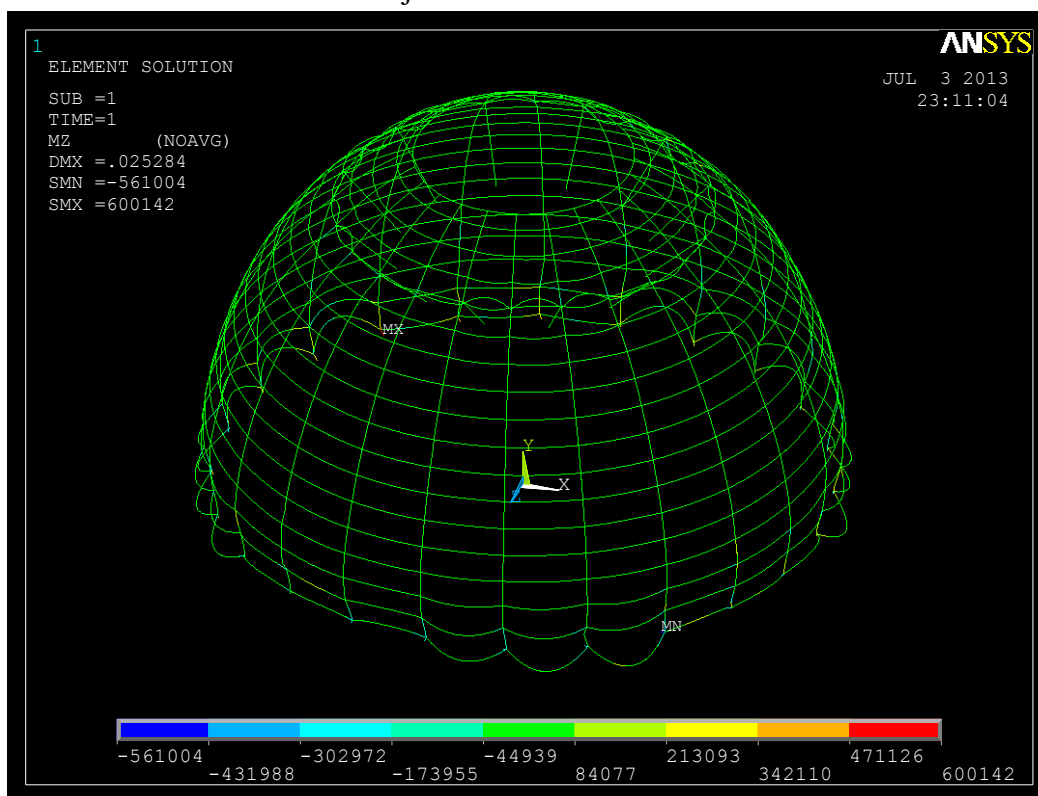


Figura 62. Distribución de momentos flectores en el elemento sin rampas debido a la temperatura.

Al igual que en puntos anteriores se ha creado la grafica de la costilla elegida:

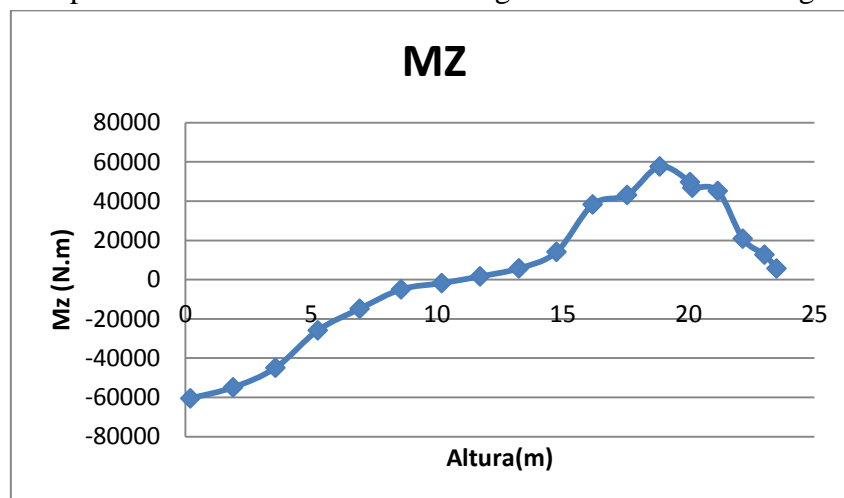


Figura 63. Variación de momentos flectores en el elemento sin rampas debido a la temperatura en una costilla

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La forma de la curva es prácticamente similar a casos anteriores, siendo es esta las variaciones de puntos mucho más suaves que en casos anteriores.

La estructura soporta las siguientes tensiones máximas:

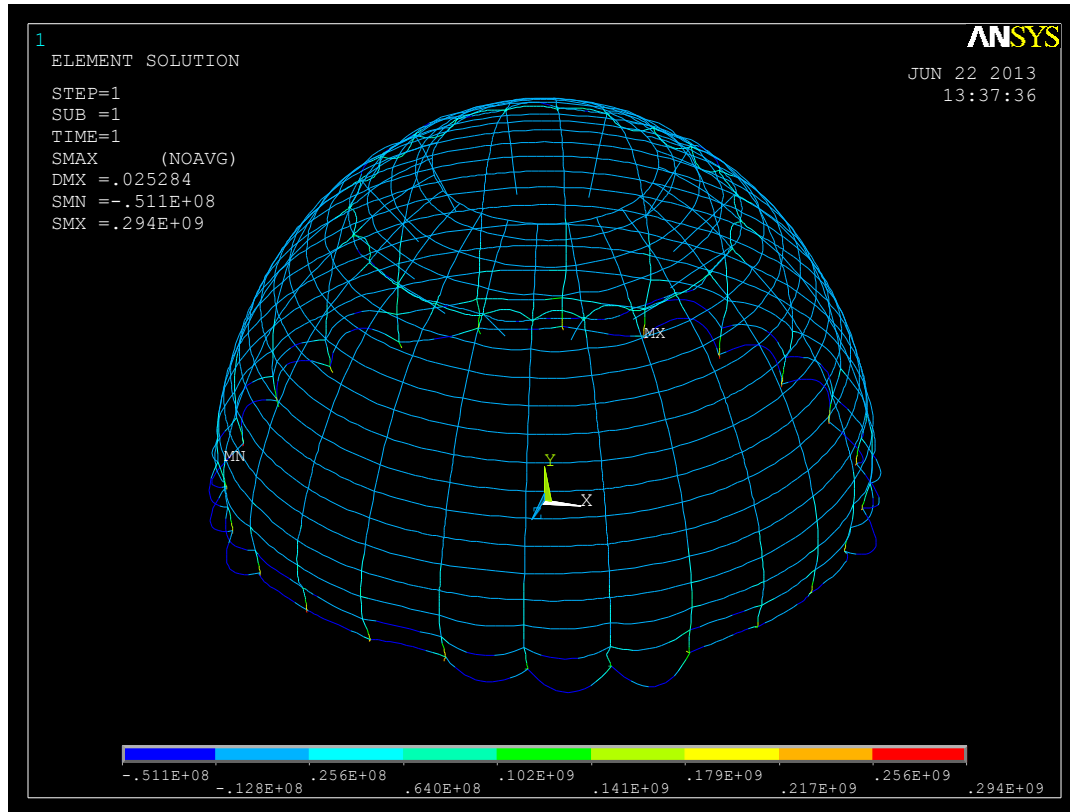


Figura 64. Tensión máxima del elemento sin rampas debida a la temperatura.

Para estudiar la tensión máxima se ha escogido una costilla cualquiera y se han medido en función de cómo varían con la altura.

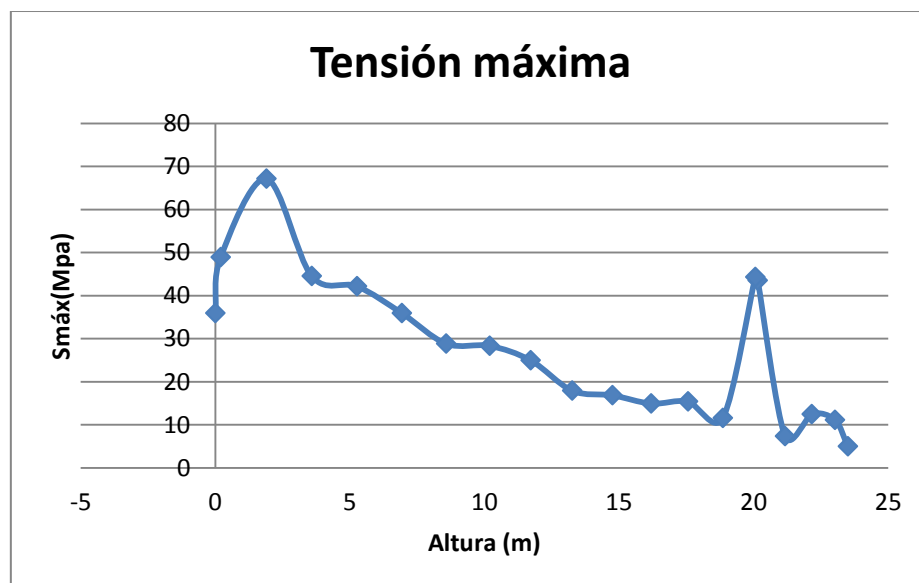


Figura 65. Variación de la tensión máxima del elemento sin rampas debida a la temperatura en una costilla.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras el repunte inicial va decreciendo progresivamente hasta alcanzar un pico en el anillo de seguridad.

3.1.2.3 Viento.

Al igual que en el apartado 3.1.1.3, se ha considerado el viento sopla desde un lateral en dirección del eje x.

La deformada que presenta la estructura no es simétrica como puede verse en la figura 66:

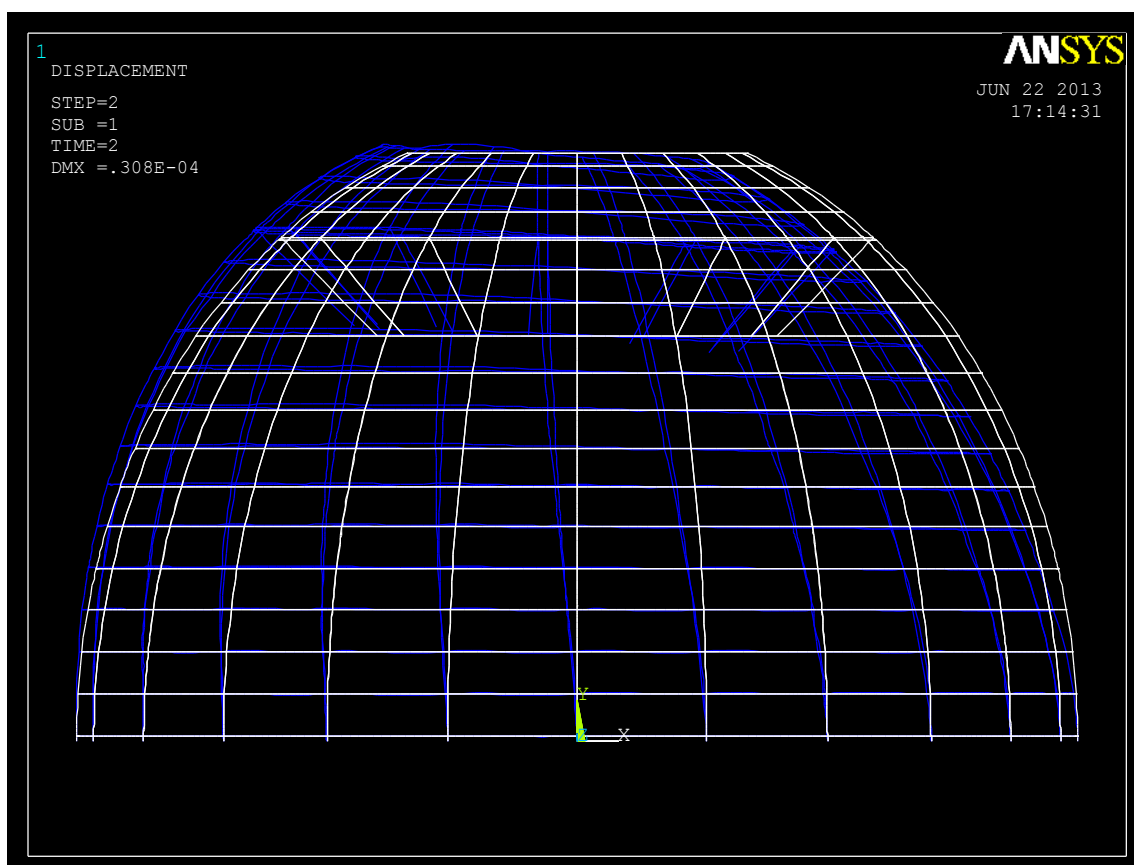


Figura 66. Deformada del elemento sin rampas debida al viento.

Al no ser simétrica, el ápice la flecha tampoco no será constante y en este caso variara desde -0.00721 hasta 0.00643mm, como puede verse en la figura de a continuación que representa los desplazamientos verticales.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

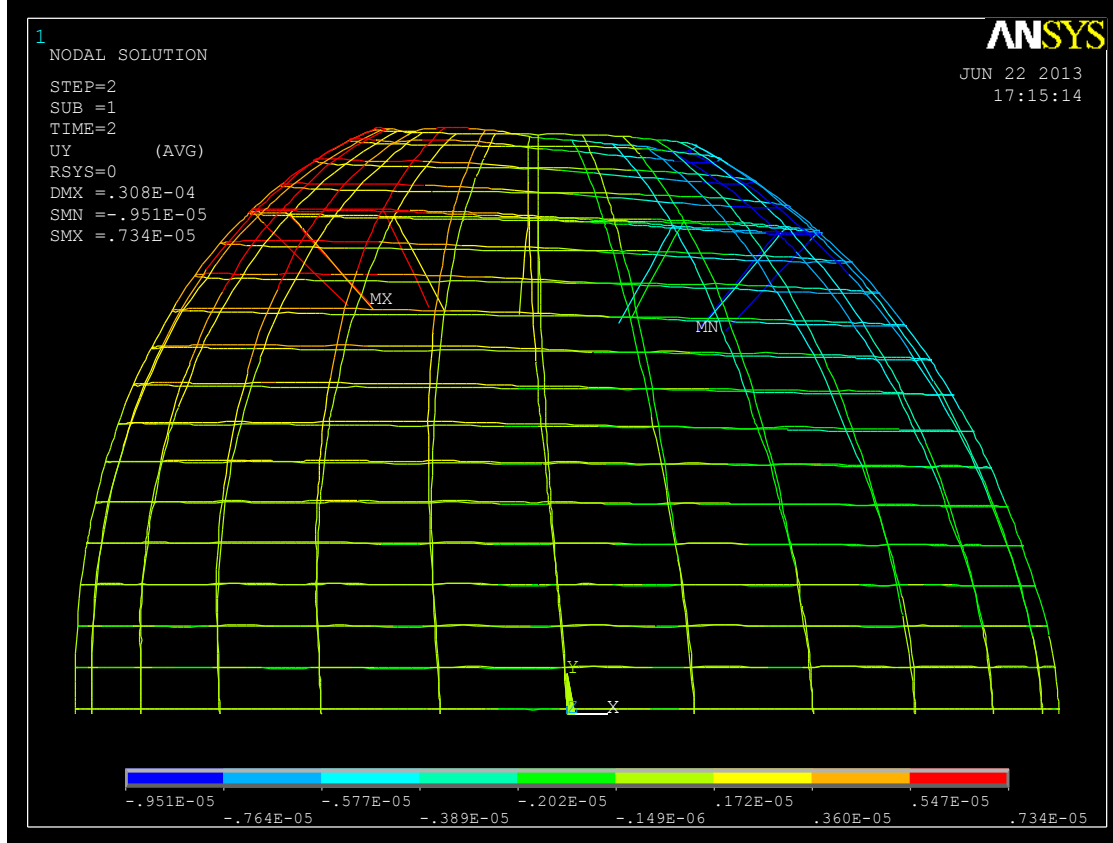


Figura 67. Desplazamiento vertical del elemento sin rampas debido al viento.

El incremento diametral del meridiano 7 resulta de:

$$\Delta\phi = \frac{\phi_f - \phi_i}{\phi_i} \cdot 100 = -0.0000316\%$$

En las figuras mostradas a continuación se pueden observar los esfuerzos axiales, la distribución de momentos flectores en el eje z y la tensión máxima que sufre la estructura.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

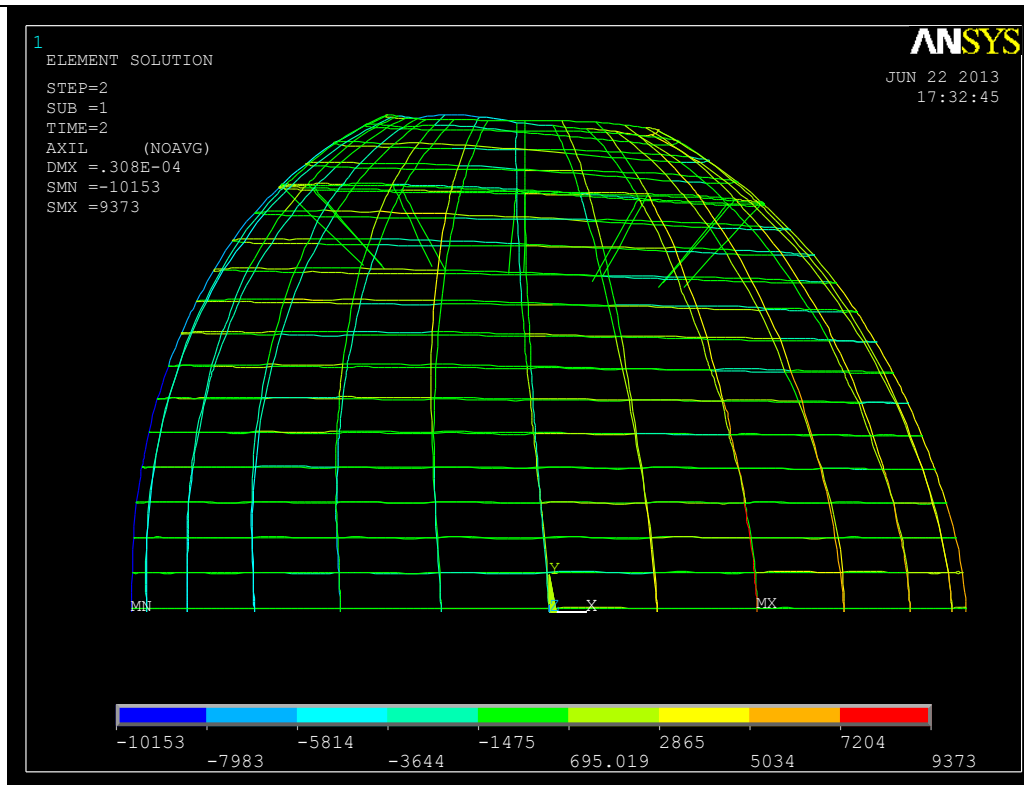


Figura 68. Tensión axial del elemento sin rampas debida al viento.

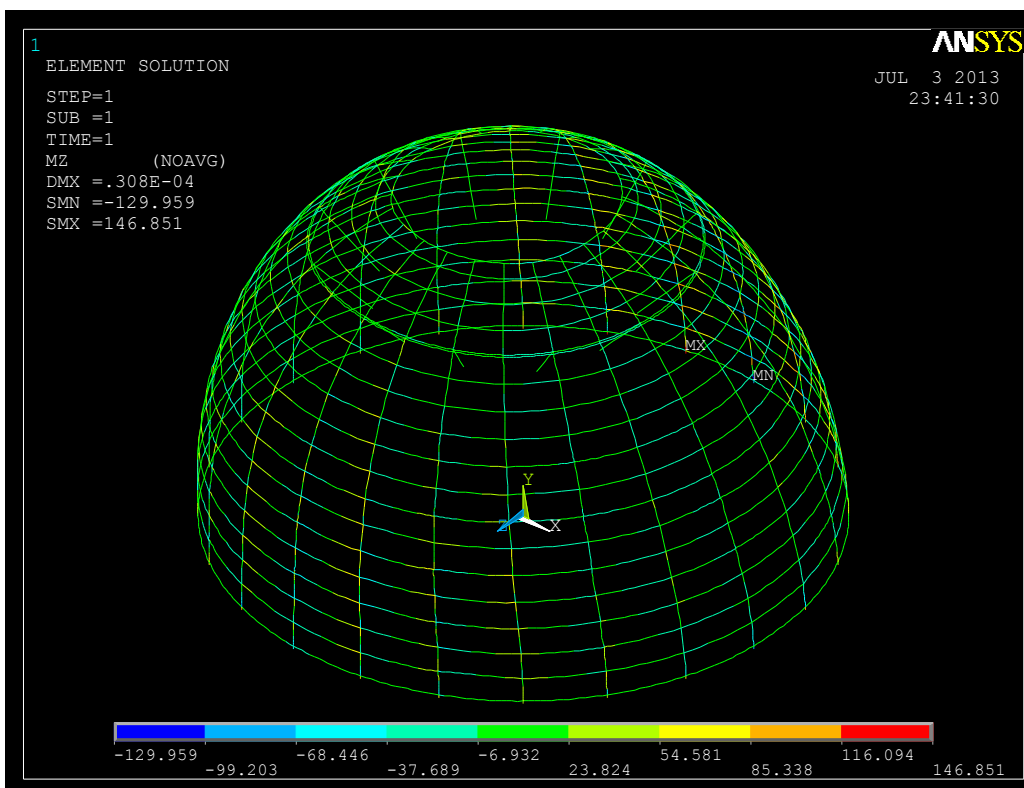


Figura 69. Distribución de momentos flectores en el elemento sin rampas debido al viento.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

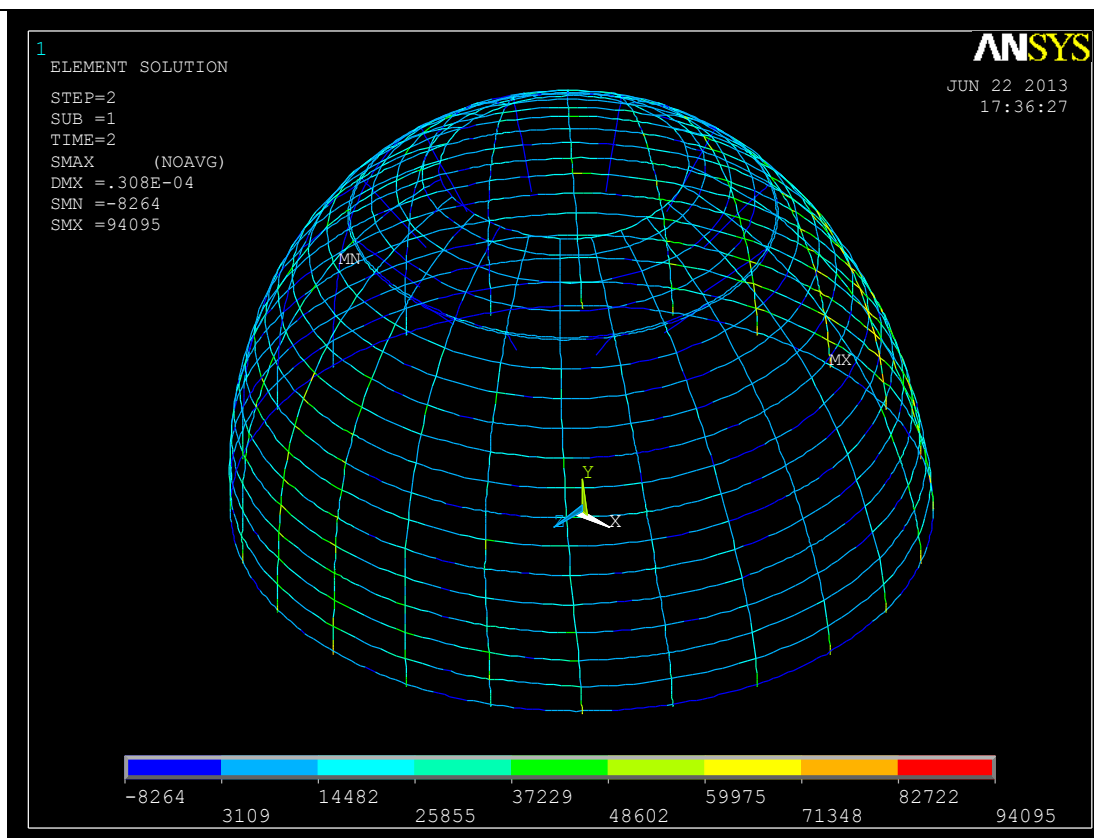


Figura 70. Tensión máxima del elemento sin rampas debida al viento

3.1.2.4. Comparación del efecto de las hipótesis elementales en la cúpula sin rampa.

Observando detenidamente los resultados, se puede deducir que las hipótesis elementales influyen del mismo modo en la estructura que en el apartado 3.1.1.4.

3.2. Análisis del efecto de las rampas y de las condiciones de contorno.

En este apartado se estudiarán el efecto que producen las rampas y las condiciones de contorno en la estructura.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.2.1. Efecto de las rampas.

El objeto de este apartado es comprobar cómo afectan las rampas en la simetría de la estructura, para ello se ha analizado cada hipótesis eliminando las rampas y los enganches que la sujetan.

Con el objetivo de lograrlo, se va a desggranar cada hipótesis por separado para ver así como contribuyen a la simetría de la estructura.

- Peso propio.

La rampa aporta a la estructura un peso extra de más de 215 Tn repartidas desigualmente a lo largo de la cúpula y obviamente esto afecta a la estructura.

Para cuantificar cuanto afecta en la simetría el exceso de carga nos fijamos en la siguiente imagen, en la cual se ve el vector desplazamiento de la estructura.

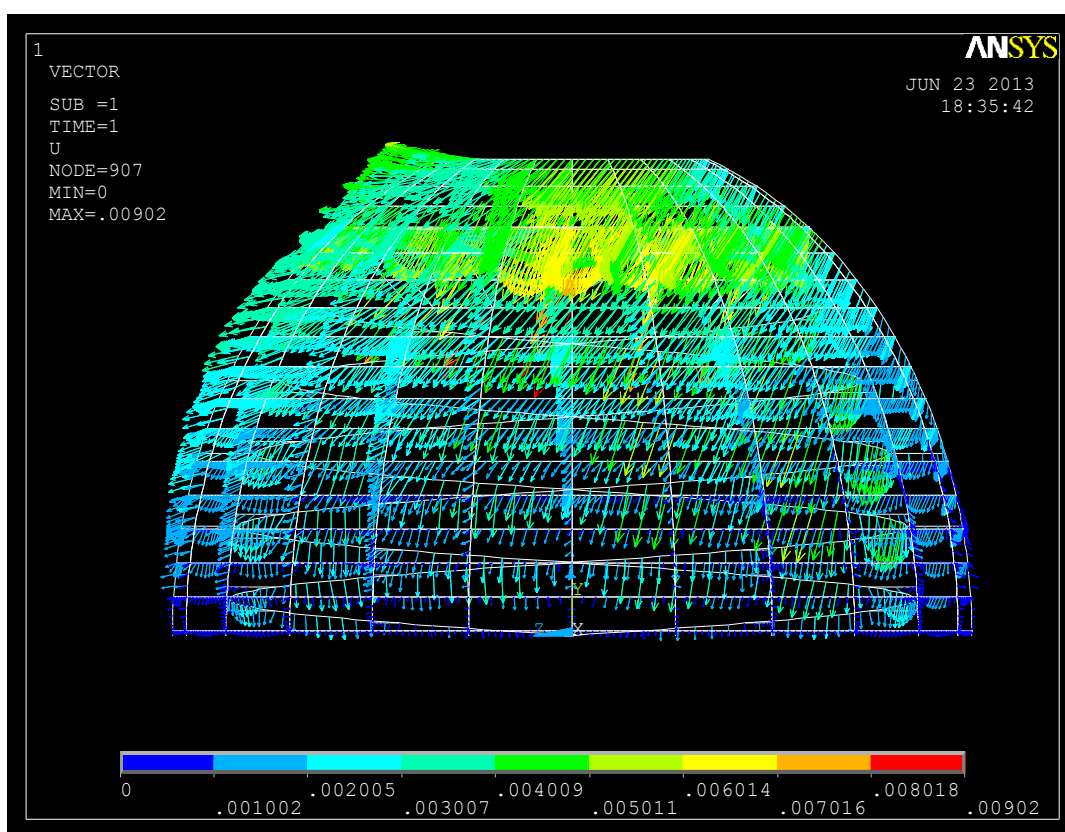


Figura 71. Vector desplazamiento del elemento real debido al peso propio.

Por el abanico de colores que presentan la figura 71 se observa a simple vista que no se desplazan de un modo simétrico ya que tiende a levantarse más de un lado que de otro.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para entender mejor porque funciona así se ha decidido realizar dos pruebas básicas.

La primera de ellas es ver si el peso que aporta el cono es la causa de este efecto y para ello se han analizado los cuatro vértices del anillo superior.

Sin embargo como se puede ver en la figura 72, el cono no es la causa de este efecto ya que sin él la estructura se levanta igualmente. Como es obvio, el desplazamiento vertical es menor ya que el peso que aporta el cono a la estructura es de aproximadamente 320 Tn.

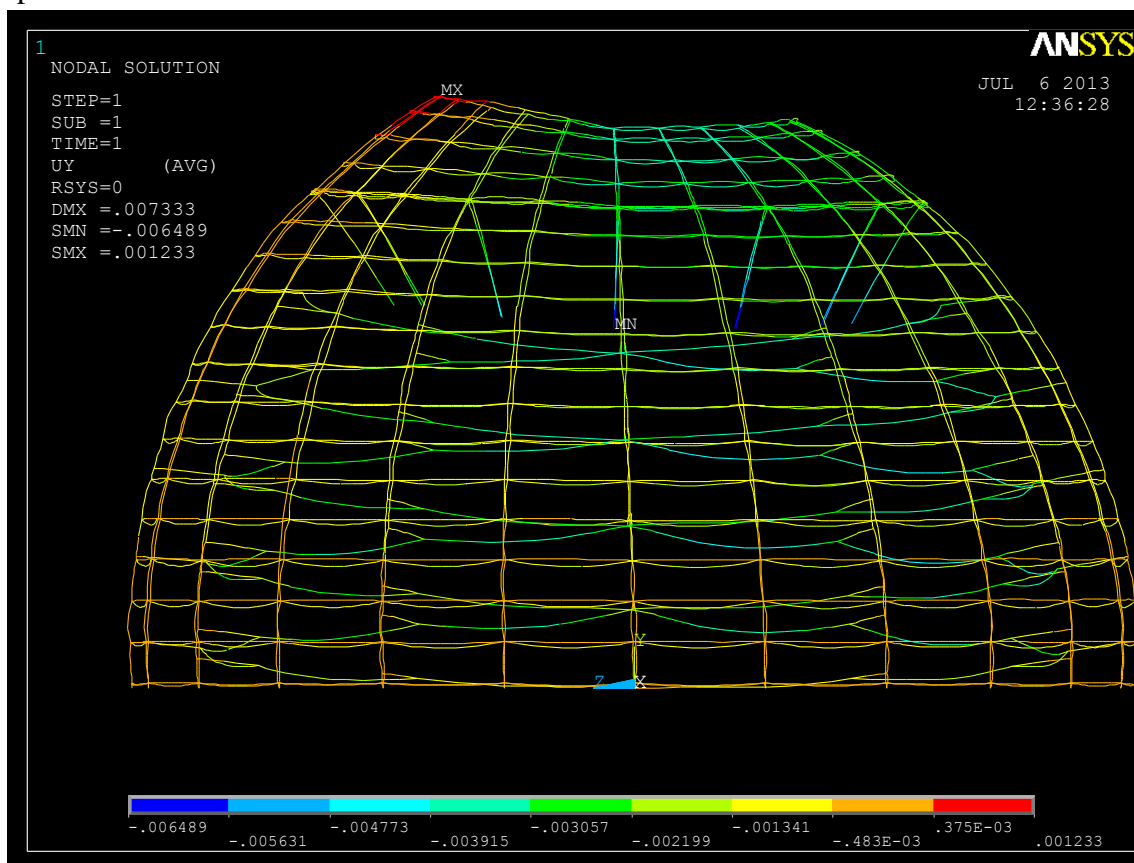


Figura 72. Desplazamientos verticales del elemento real debido al peso de las secciones y de la cristalera.

Si se analiza en profundidad como se mueve radialmente y los momentos flectores que sufren los cuatro puntos de los ejes del anillo superior, se ve que sobre el eje z, que es donde terminan las dos rampas, los dos puntos se desplazan en la dirección positiva del eje. Por contra en el eje x, se desplazan los dos puntos hacia el centro del anillo, en valores prácticamente iguales.

En cuanto a los flectores, la parte derecha de la estructura flexa más que la izquierda.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

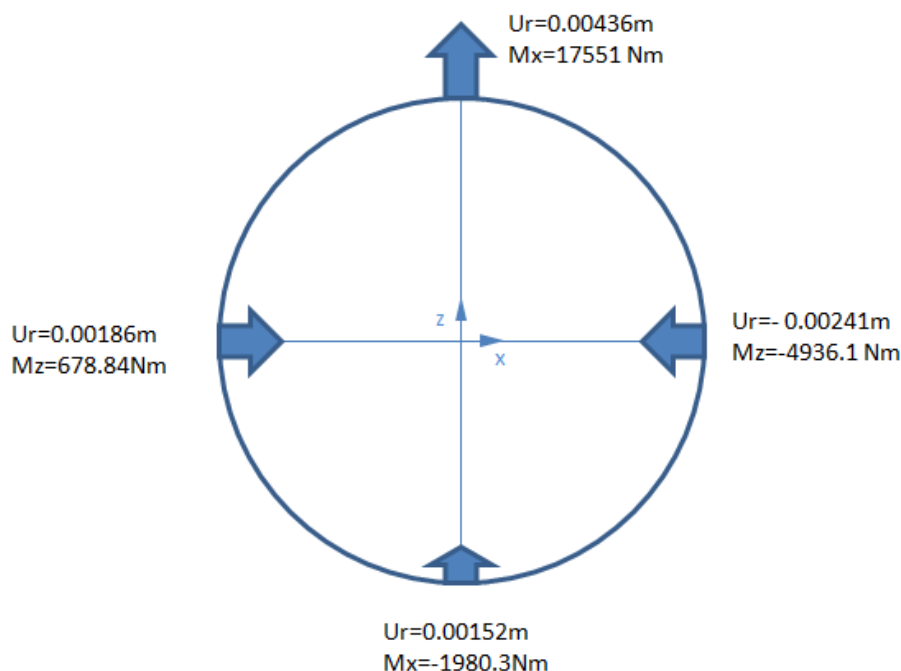


Figura 73. Movimientos y flectores del anillo superior sin el peso del cono

La segunda prueba que se realizó es diseñar el anillo de seguridad con una área y momentos de inercia mucho menores, para hacer el anillo “débil”. También en esta prueba se ha eliminado el peso del cono.

Al resolver este supuesto, se constata que los resultados obtenidos son idénticos a los del caso anterior, viendo que el anillo de seguridad no es el causante de la asimetría que se produce en la estructura.

Por tanto después de analizar estas pruebas se ha llegado a la conclusión que éste efecto se produce por la rigidez que aporta las dos rampas a la estructura.

No obstante, al eliminar las rampas de la estructura se obtiene el siguiente vector de desplazamiento.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

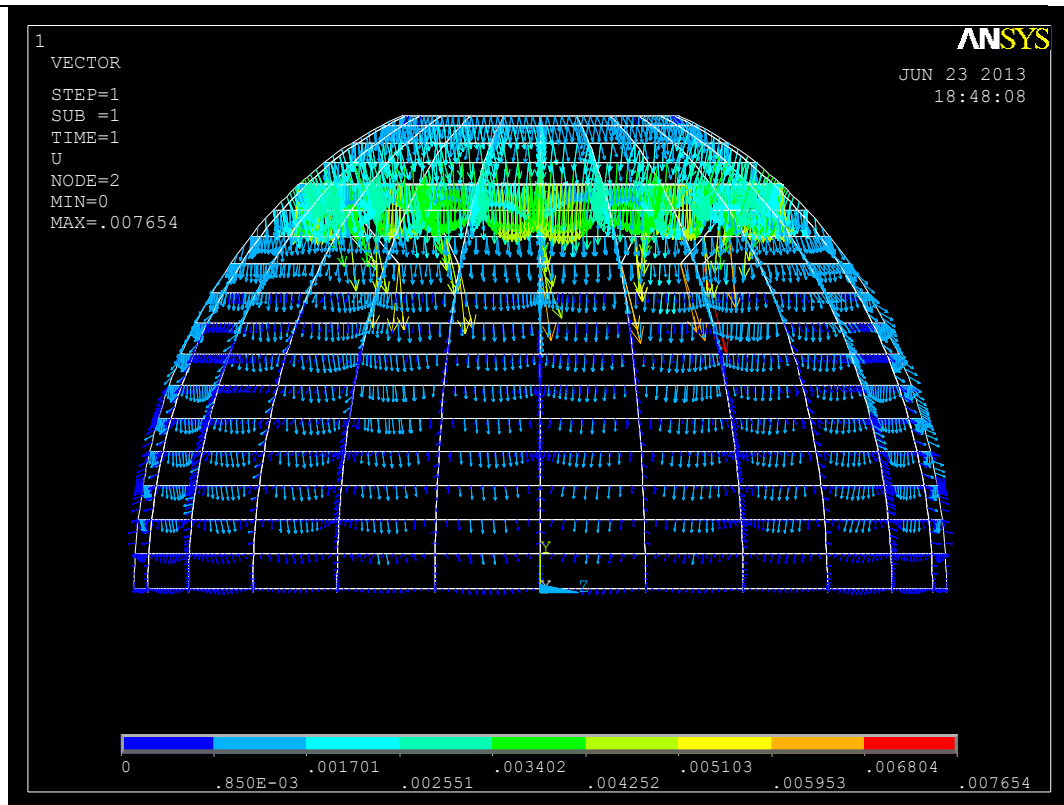


Figura 74. Vector desplazamiento del elemento sin rampas por peso propio.

En esta figura se observa claramente que los desplazamientos que sufre la estructura son simétricos, siendo mucho mayores en los meridianos más próximos al anillo de seguridad, el cual soporta el peso del cono. La estructura al eliminar las rampas se convierte en axilsimétrica y la carga aplicada es simétrica por tanto resulta lógico este resultado.

- Temperatura.

En el supuesto de la temperatura apenas afectan a las rampas a la simetría, ya que al no considerar el peso que éstas poseen y al aplicar la carga de temperatura solamente a las secciones exteriores, que son simétricas, su deformada también lo es.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

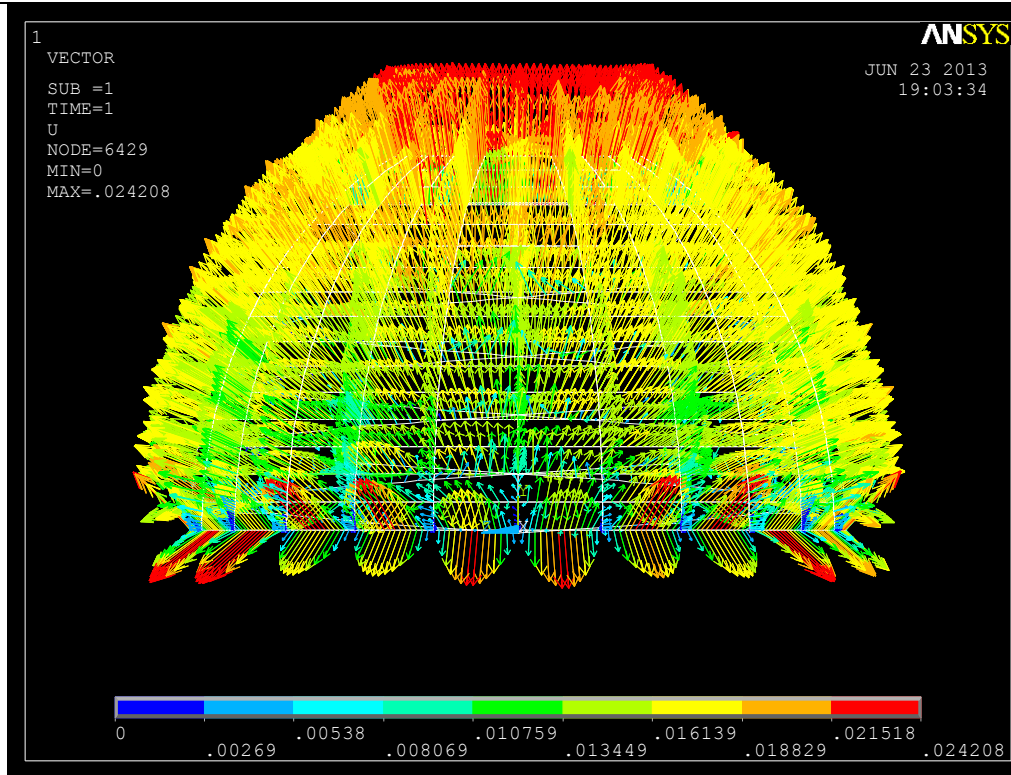


Figura 75. Vector desplazamiento del elemento real por temperatura

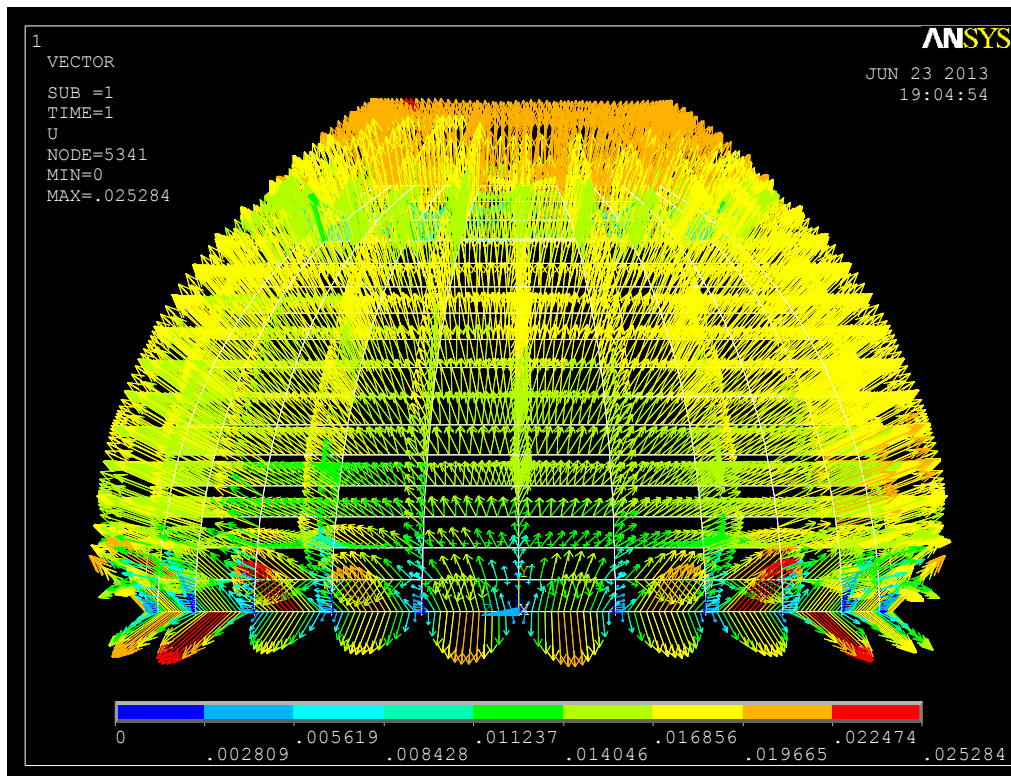


Figura 76. Vector desplazamiento del elemento sin rampa por temperatura.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las dos figuras se ve que los desplazamientos son simétricos y que prácticamente poseen los mismos valores. Se aprecia que existe en ambas, el hecho de que en los meridianos más próximos al suelo, la deformación en forma de pétalos de flor, tal y como se había mencionado anteriormente.

- Viento.

En la carga del viento, la estructura lógicamente se comporta asimétricamente ya que la carga aplicada lo es. En las figuras posteriores se observa cómo se desplazan las dos estructuras.

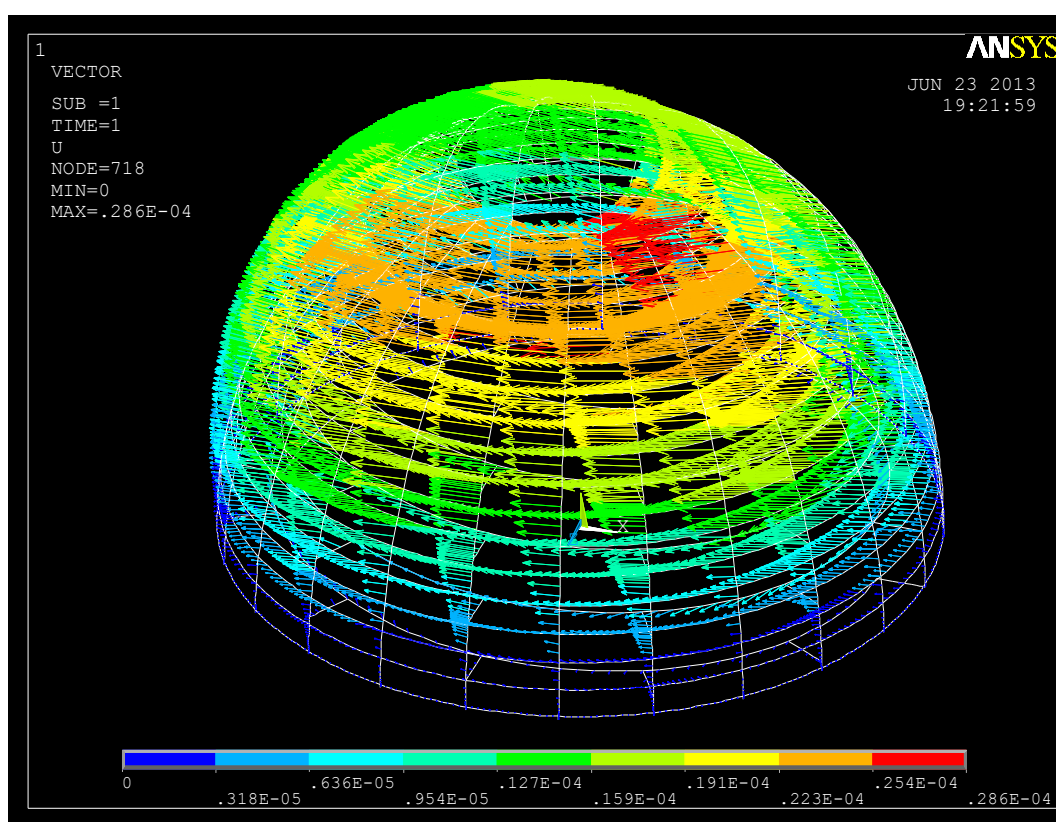


Figura 77. Vector desplazamiento del elemento real por viento.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

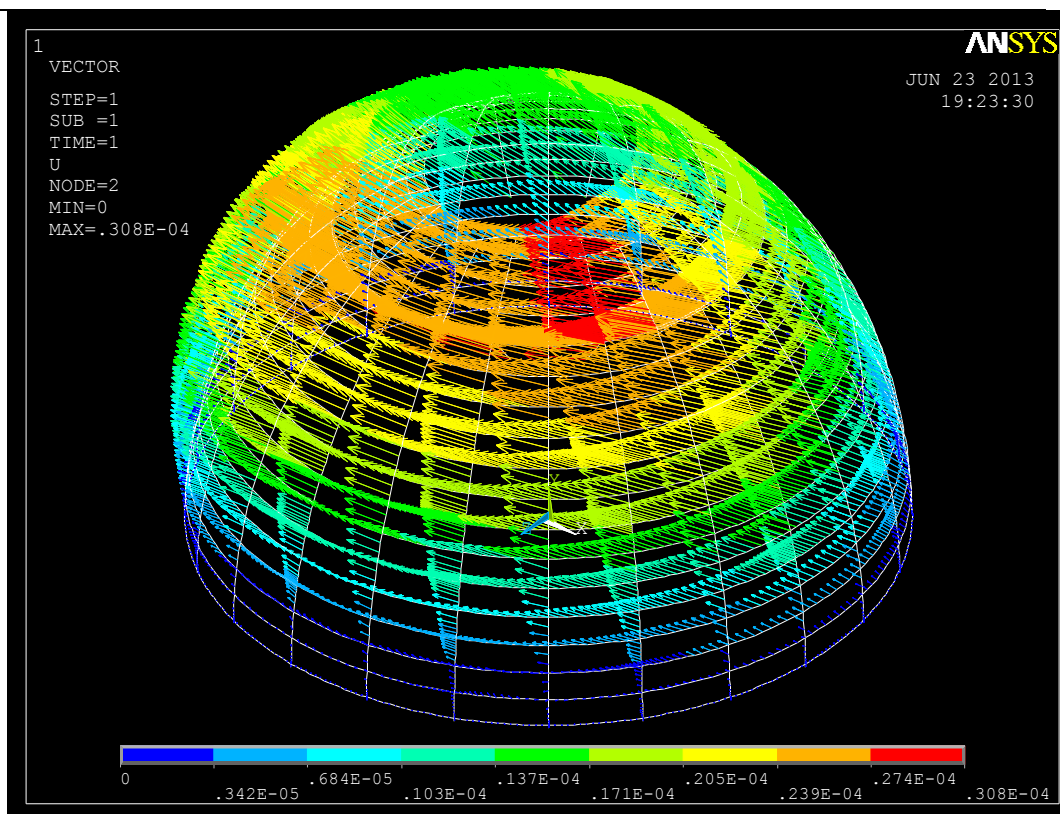


Figura 78. Vector desplazamiento del elemento sin rampa por viento.

Ambas se desplazan de manera análoga siendo un poco mayor en la que no posee rampas pero el incremento es muy pequeño.

A modo de conclusión se puede decir que donde afecta significativamente las rampas es en el peso propio ya que es donde aporta la causa de asimetría. En las otras dos, en lo único que influye es en que los desplazamientos son un poco mayores en el caso que no exista la rampa.

3.2.2. Efecto de las condiciones de contorno.

El objetivo de este apartado consiste en ver cómo influyen las condiciones de contorno en la estructura. Para ello, se ha elegido la hipótesis de peso propio en la estructura real. En ella se compararán los esfuerzos y desplazamientos que sufre si se encuentra empotrada o simplemente apoyada en la base.

Nos hemos fijado en unos aspectos claves de la estructura y éstos se compararán a continuación:

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Deformada:

La deformada que sufren en los dos supuestos es idéntica. A simple vista es imposible distinguir cuál es cuál, pero profundizando en los resultados la deformada es ligeramente mayor en el supuesto de simplemente apoyada.

- Flecha en el ápice de la cúpula:

En este aspecto, al igual que en el de la deformada, la flecha tampoco cambia excesivamente como se puede ver en la siguiente tabla:

	Apoyado	Empotrado
Rango de desplazamientos	-4.378 a 1.448 mm	-4.132 a 1.429 mm
Desplazamiento medio	-1.4565	-1.3903

Tabla 15. Comparación de flechas debidas al peso propio.

Como cabría esperar, la flecha es ligeramente mayor en el caso de que se encuentre apoyado en lugar de empotrado.

- Incremento diametral de un meridiano:

En este caso para ver cómo afectan las condiciones de contorno, no se va a escoger el meridiano 7, si no el 16 y el 17 ya que son los que están más próximos al suelo, situándose respectivamente a 1.9 y 0.2 metros de altura.

	Apoyado	Empotrado
Meridiano 16	0,00483%	0,00321%
Meridiano 17	0,00029%	0,00025%

Tabla 16. Comparación de incremento diametral debido a peso propio.

Se ve que en los puntos más cercanos al suelo las condiciones de contorno afectan de un modo más significativo, produciéndose mayores dilataciones o desplazamientos cuando las condiciones de contorno son de simplemente apoyado que cuando la estructura esta empotrada ya que al no restringirse los giros, posee libertad para rotar desde la base.

- Tensión axial:

La principal diferencia en la tensión axial radica en los valores mayores de axiles a tracción, lo que significa que solamente afecta la variación de condiciones de contorno a las secciones más cercanas al suelo, como puede verse en las siguientes figuras:

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

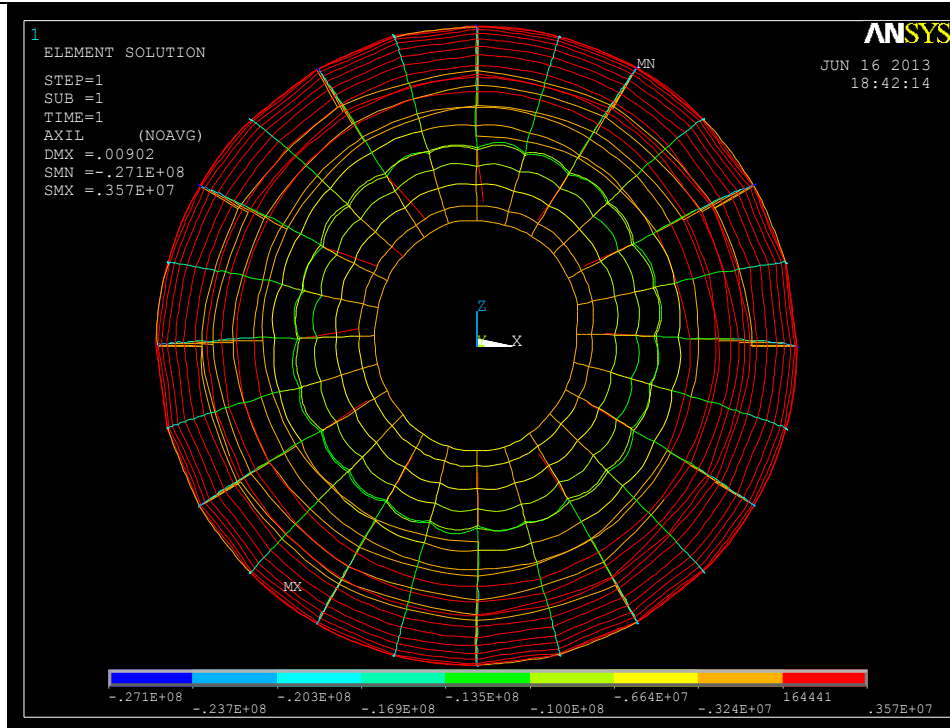


Figura 79. Tensión axial debida a peso propio en elemento real empotrado

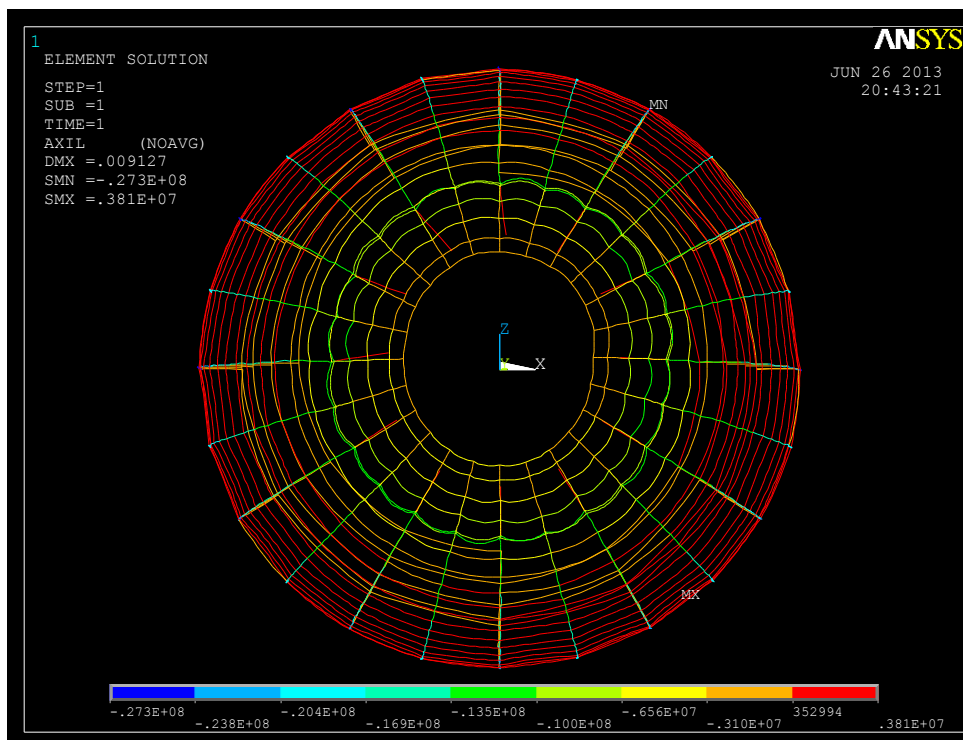


Figura 80. Tensión axial debida a peso propio en elemento real apoyado

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observa que las dos figuras prácticamente tienen los mismos valores a alturas superiores del anillo de seguridad. Sin embargo a alturas inferiores se incrementa el valor de axil progresivamente en el caso que solamente esté apoyado. Esto es debido a que la estructura cuando está apoyada tiende a expandirse más que cuando se encuentra empotrada, por tanto se producen mayores tensiones al intentar frenarla, notándose este efecto mucho más en los punto de influencia a las condiciones de contorno.

- Momento flector

Tal y como se ven en las figuras de a continuación, los momentos flectores son ligeramente mayores en el caso de que se encuentre apoyado que empotrado.

No obstante la mayor diferencia entre ellos radica el en valor de ellos en las condiciones de contorno. Se ha realizado el estudio en la costilla que se encuentra sobre la parte positiva del eje x y se comprueba que en el caso de que la estructura se encuentre apoyada, el valor en el suelo es cero, sin embargo cuando esta empotrada el valor es -34629N.m.

Cabe mencionar que sobre la costilla elegida no se produce ningún punto de inflexión en el caso apoyado como ocurría cuando se encontraba empotrada.

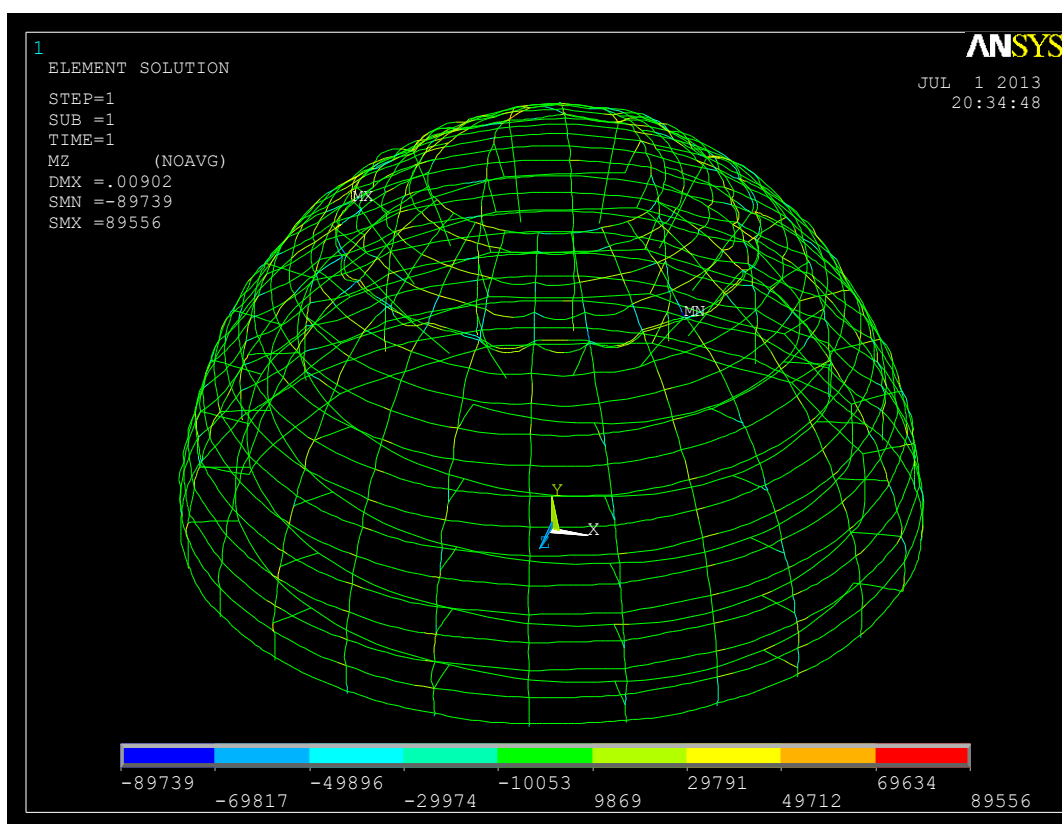


Figura 81. Distribución de momentos flectores debida a peso propio en elemento real empotrado.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

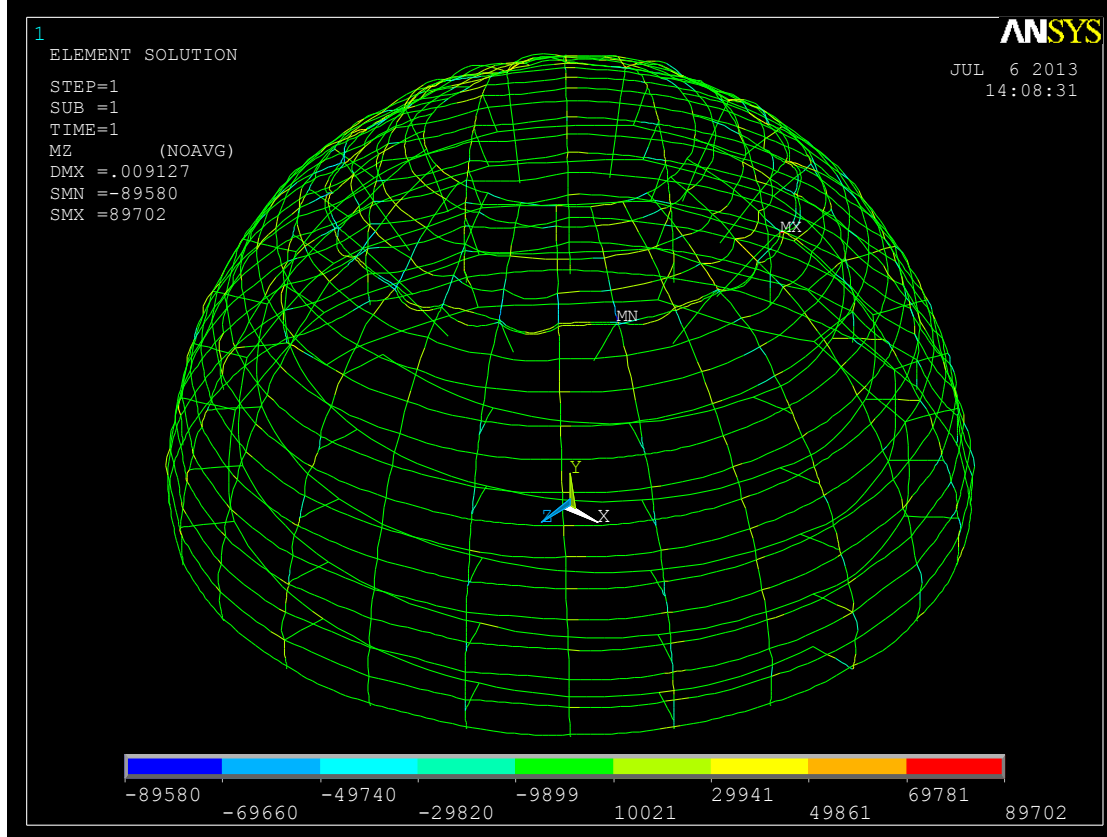


Figura 82. Distribución de momentos flectores debida a peso propio en elemento real apoyado.

- Tensión máxima (directa + Flexión)

Las tensiones son ligeramente mayores en caso apoyado que en el empotrado como se puede ver en las siguientes figuras:

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

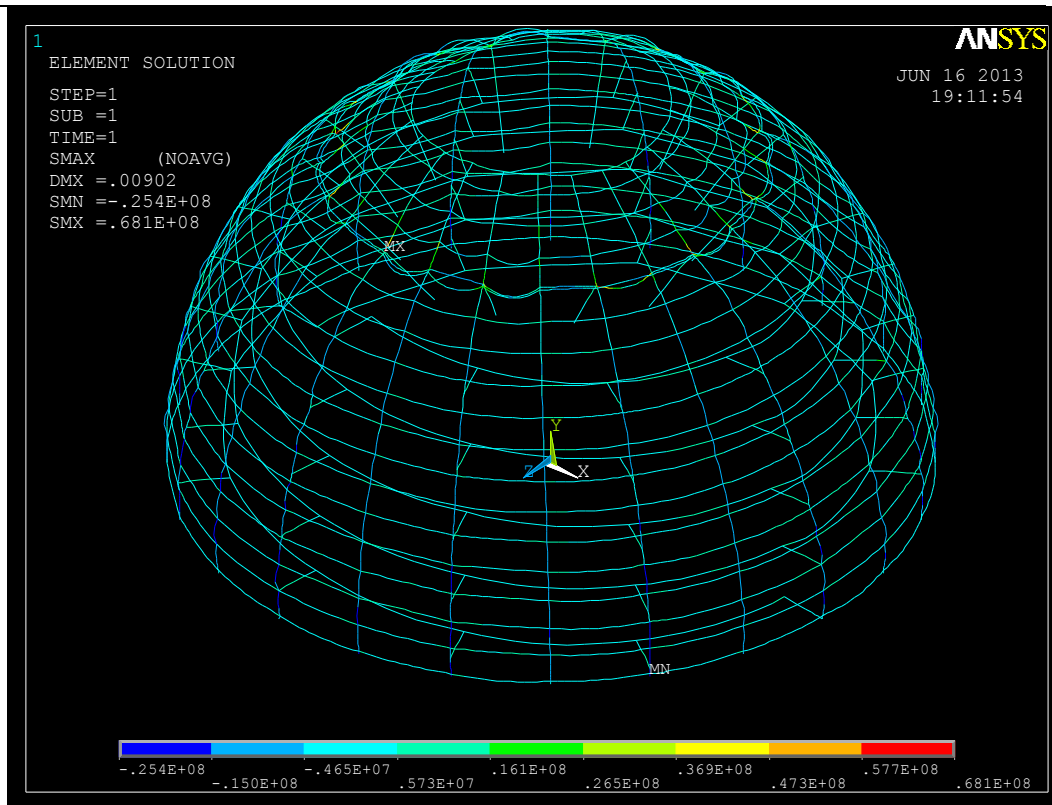


Figura 83. Tensión máxima debida a peso propio en elemento real empotrado.

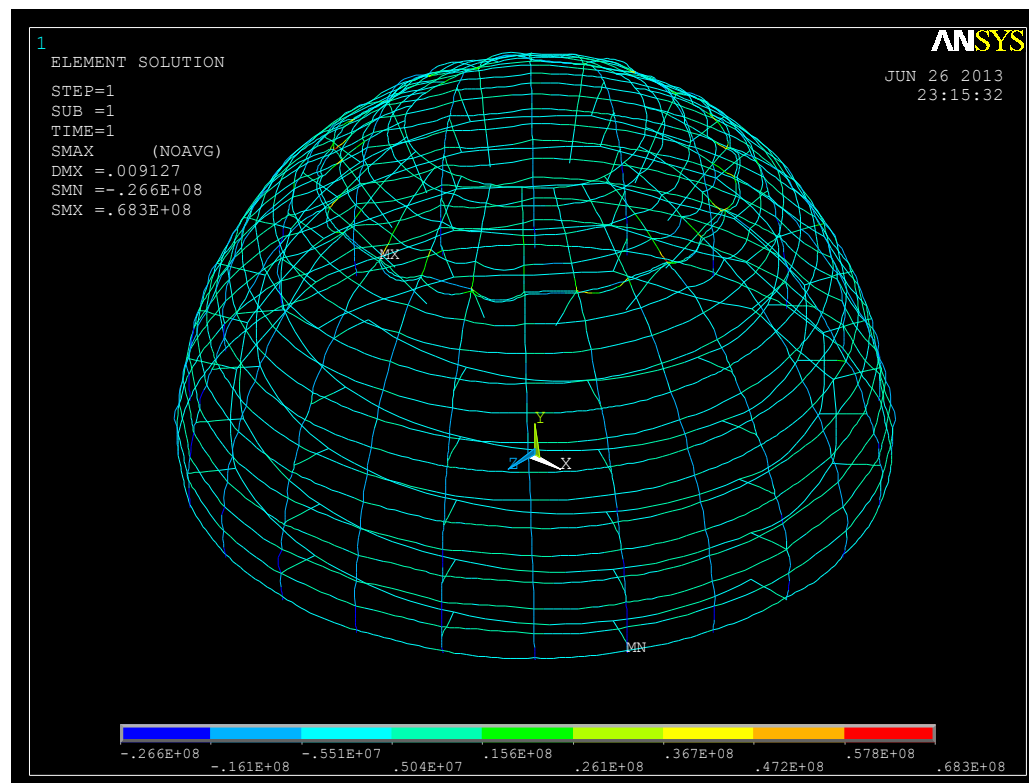


Figura 84. Tensión máxima debida a peso propio en elemento real apoyado.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este caso, al contrario que sucedía en el caso de las tensiones axiales, las tensiones se incrementan en toda la estructura y no solo en los puntos cercanos al empotramiento. Esto es debido a que también tiene en cuenta la flexión, que afecta de un modo más significativo al supuesto apoyado.

3.3. Análisis de diseño.

El objetivo de este apartado consiste en realizar un análisis de la estructura considerando todas las hipótesis de carga, ya mayoradas según se ha explicado en el apartado “Combinación de acciones”.

No obstante, aunque en dicho apartado se han descrito dos combinaciones posibles, solamente se va a realizar la combinación 1, en la que la temperatura es la sobrecarga principal. Se ha decidido esto, por los análisis previos que se han realizado ya que en absolutamente todos los casos, la hipótesis más desfavorable es la temperatura y el viento apenas influye en la estructura.

Como en casos anteriores se van a analizar una serie de puntos claves para ver cómo se comporta la estructura:

- Deformada:

La estructura posee la siguiente deformada:

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

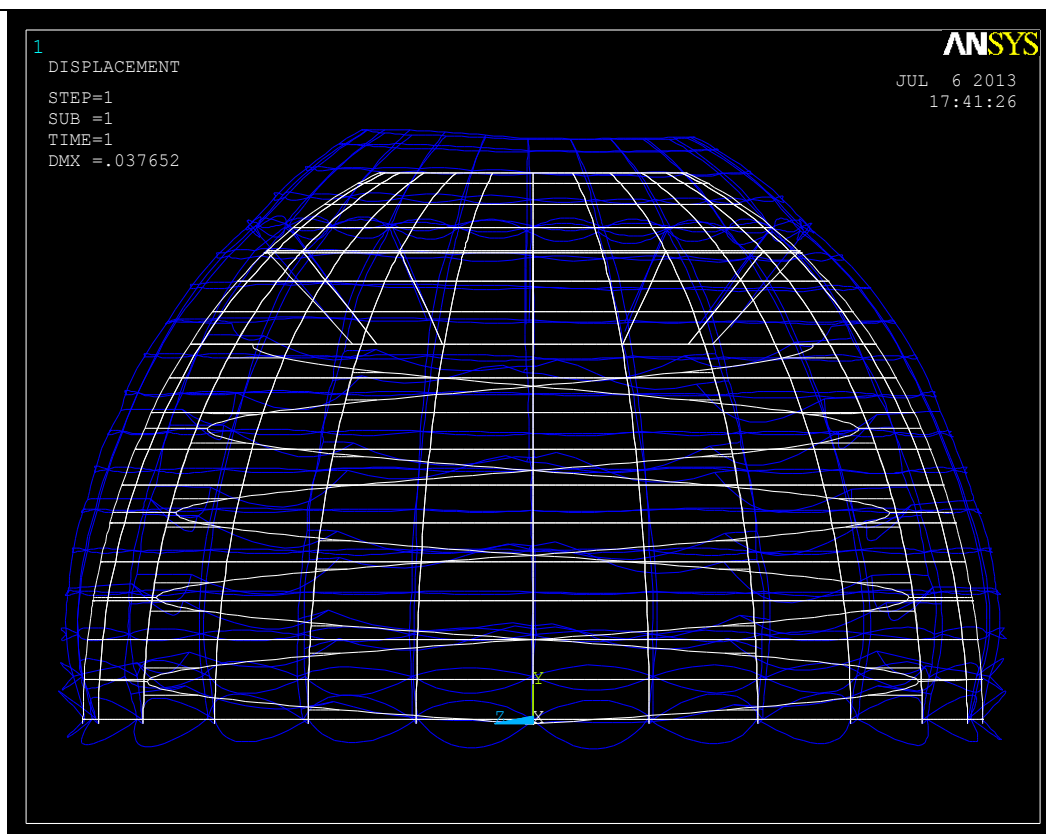


Figura 85. Deformada de la estructura en combinación 1 de cargas.

Se observa como varía respecto de la estructura original. La deformada se asimila a la que se veía en casos anteriores de temperatura, con la salvedad que en ápice se observa que se levanta más un lado de otro a causa del peso propio.

- Flecha en el ápice de la cúpula:

La flecha en el ápice el de valor positivo, dependiendo de los distintos puntos varía desde 25.73 mm hasta 33.91 mm. Este incremento positivo es debido a la carga de temperatura mayorada.

Las rampas y puntos de los meridianos 16 y 17 son los únicos puntos de la estructura que sufren desplazamientos verticales negativos.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

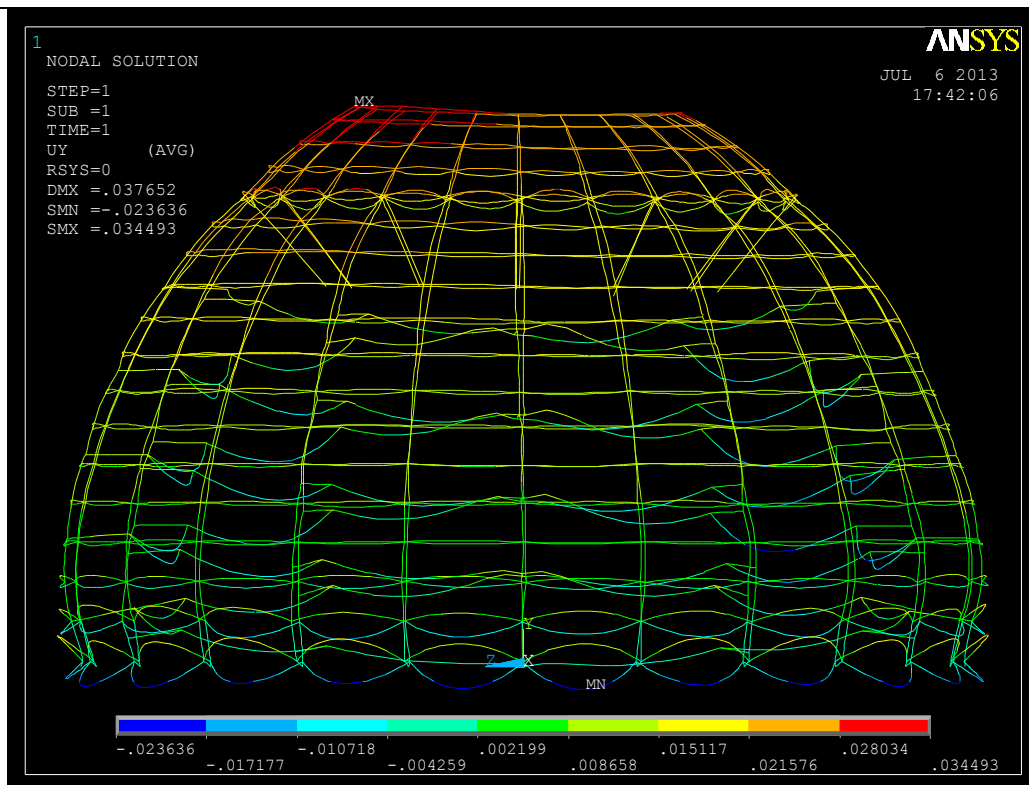


Figura 86. Desplazamientos verticales de la estructura en combinación 1 de cargas.

- Tensión axial:

Los elementos más tensionados son sin lugar a dudas los meridianos más próximos al suelo y el anillo de seguridad.

La tensión que sufren los meridianos es debida a la influencia de los empotramientos que no dejan dilatar a la estructura y la que sufre el anillo, es a causa de que éste no está sometido a temperatura por ser interior, por tanto sufre la dilatación de los otros miembros aparte de soportar el peso del cono.

La distribución de tensiones axiales puede verse en la figura 87:

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

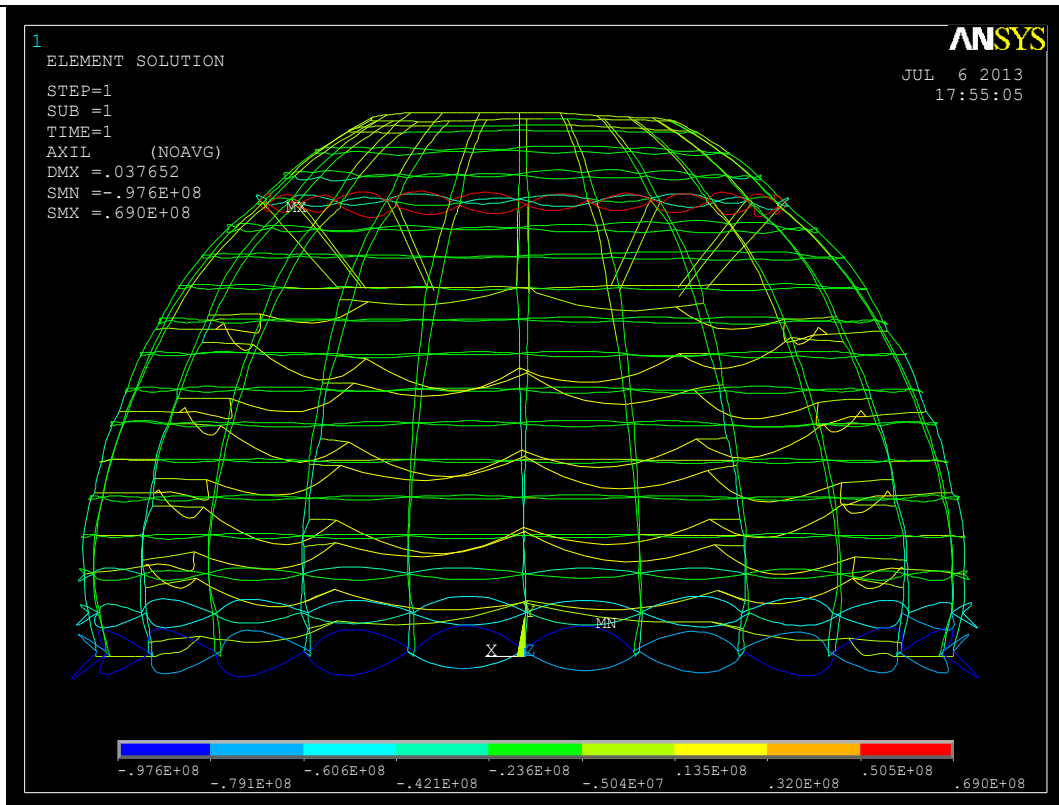


Figura 87. Tensión axial de la estructura en combinación 1 de cargas.

- Momento flector

La estructura flexa de acuerdo a como se ve en la figura 88:

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

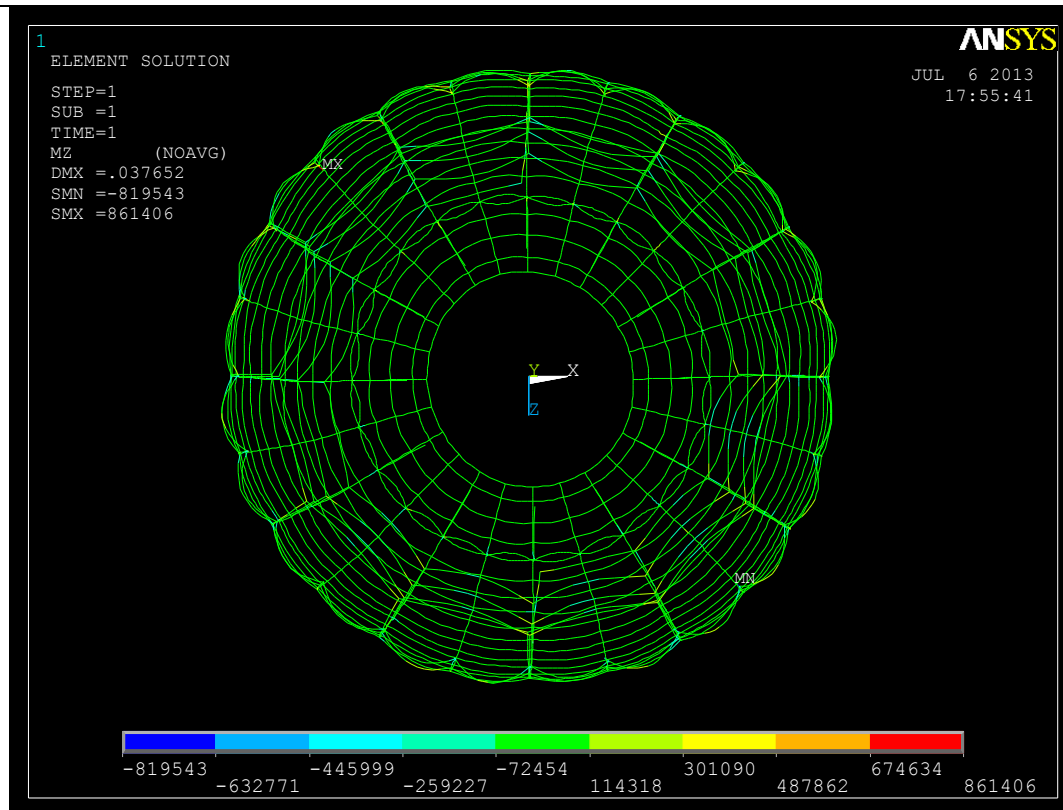


Figura 88. Momentos flectores de la estructura en combinación 1 de cargas.

Soporta valores negativos en los empotramientos para ir creciendo progresivamente hasta alcanzar su valor máximo positivo a la altura del meridiano 5. Posteriormente decrece más significativamente pero siempre dentro de valores positivos.

- Tensión máxima (directa + Flexión)

En la figura de a continuación se muestran las tensiones máximas que sufre la estructura

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

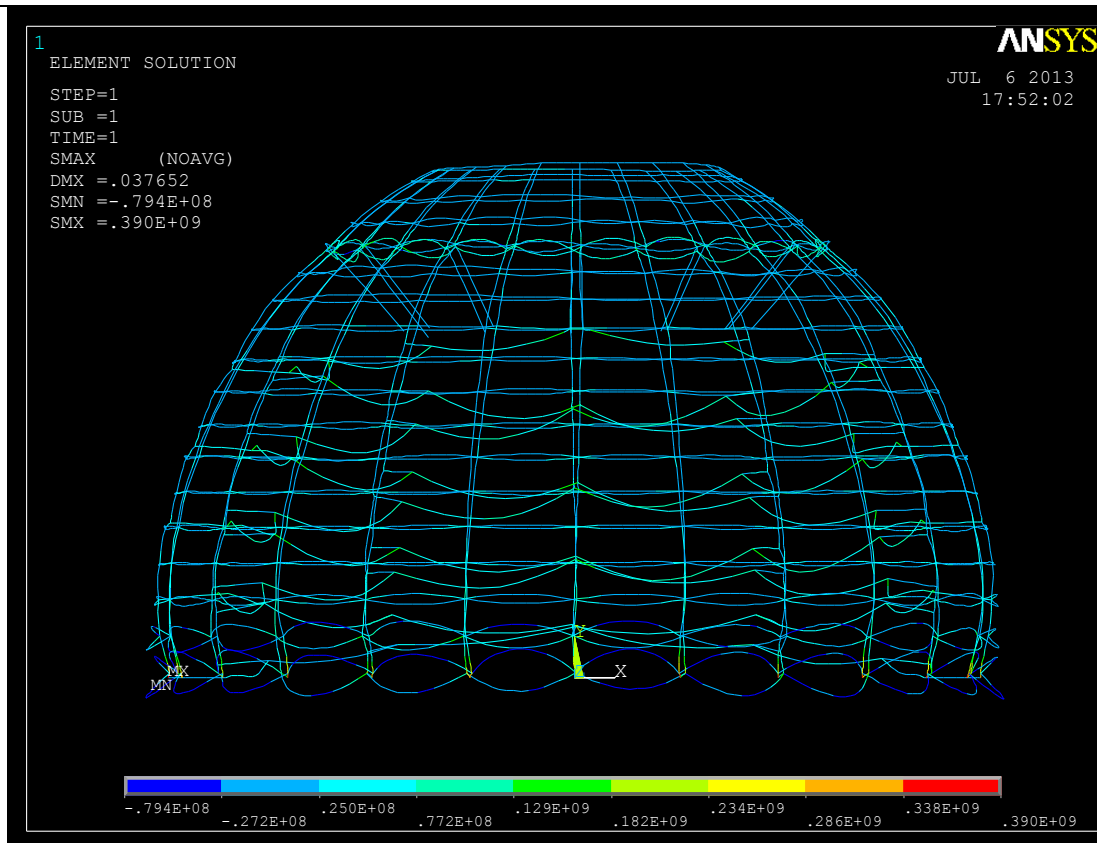


Figura 89. Tensión máxima de la estructura en combinación 1 de cargas.

Se observa que los puntos que están sometidos a mayores tensiones son los puntos de las costillas que están próximos al suelo.

La tensión máxima que sufre la estructura es de 390 Mpa, siendo esta muy inferior al límite elástico del acero que es $210 \cdot 10^3$ Mpa. Por tanto se puede concluir que aún en la peor combinación de cargas posibles la estructura resistirá.

3.4. Análisis modal

Se han escogido las seis primeras frecuencias de vibración, para poder ver como se deforma la estructura:

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Modo 1: 1.967 Hz. Cabeceo sobre el eje z

En este modo de vibración la estructura cabecea sobre el eje z, produciéndose el repunte mayor de altura en la parte negativa del eje

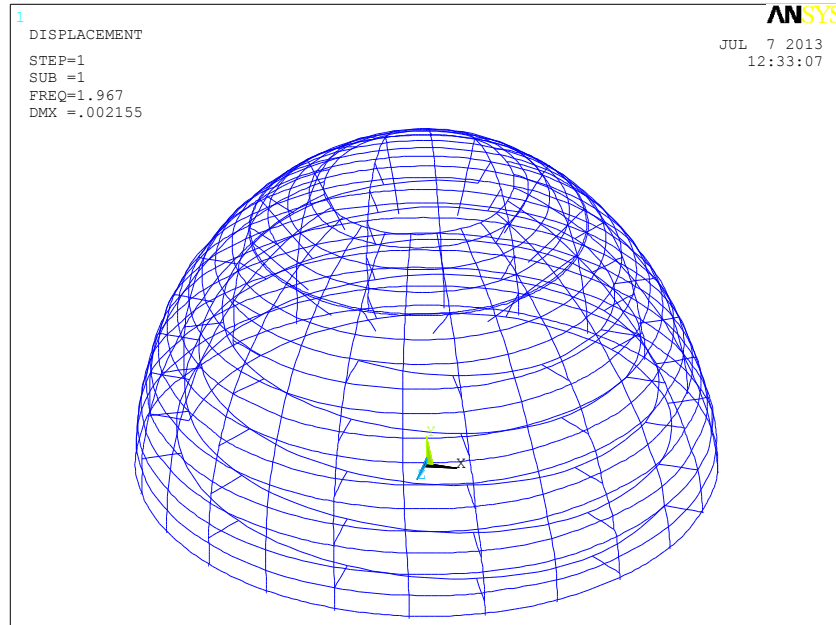


Figura 90. Modo de vibración 1

- Modo 2: 2.335 Hz.

Éste modo reproduce el mismo movimiento que el anterior pero el lugar de sobre el eje z, lo hace sobre el eje x.

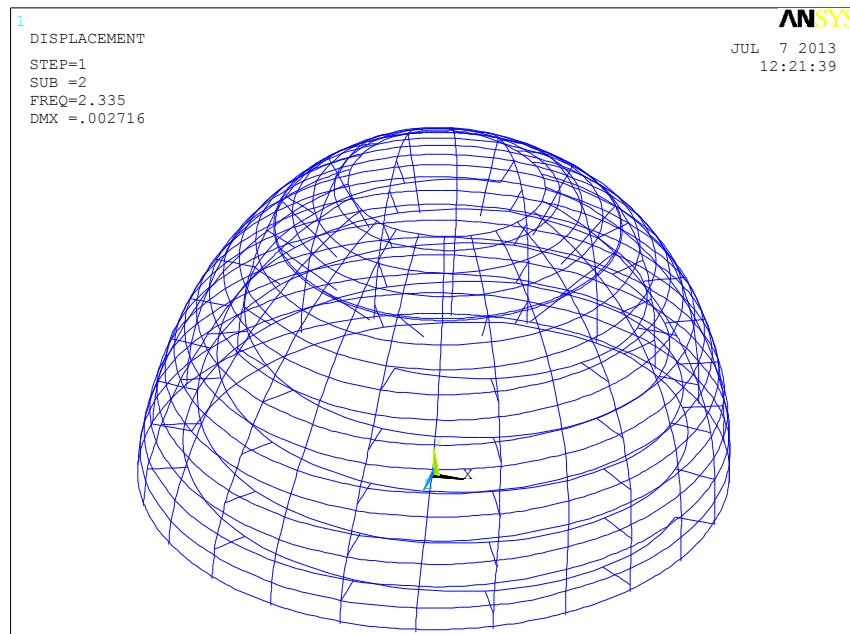


Figura 91. Modo de vibración 2.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- **Modo 3:** 3.266 Hz.

La estructura experimenta flexo - torsión, afectando en mayor medida a la zona negativa del eje z.

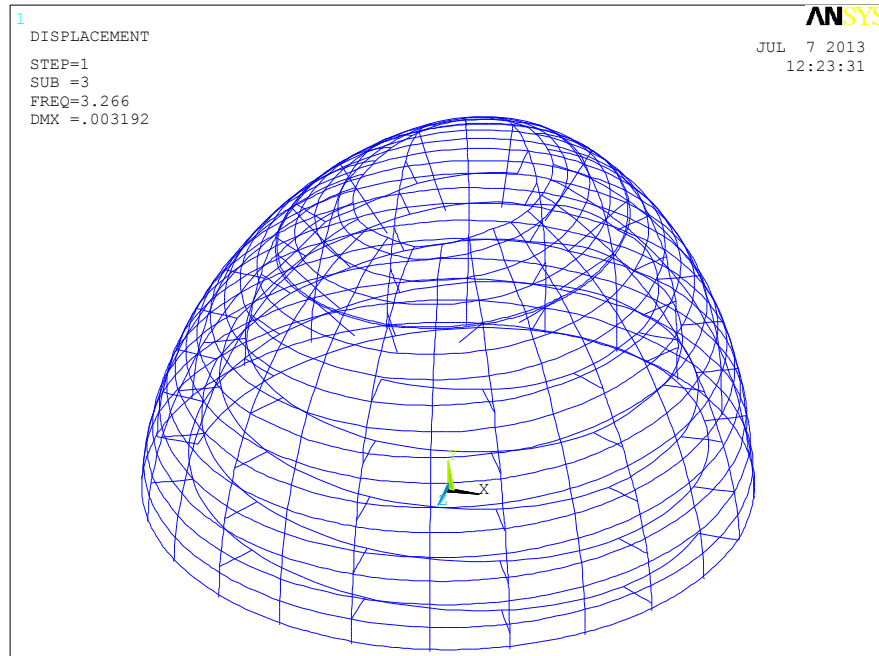


Figura 92. Modo de vibración 3.

- **Modo 4:** 3.493Hz.

La estructura experimenta un modo de torsión en el cuál tiende a “achatarsse”.

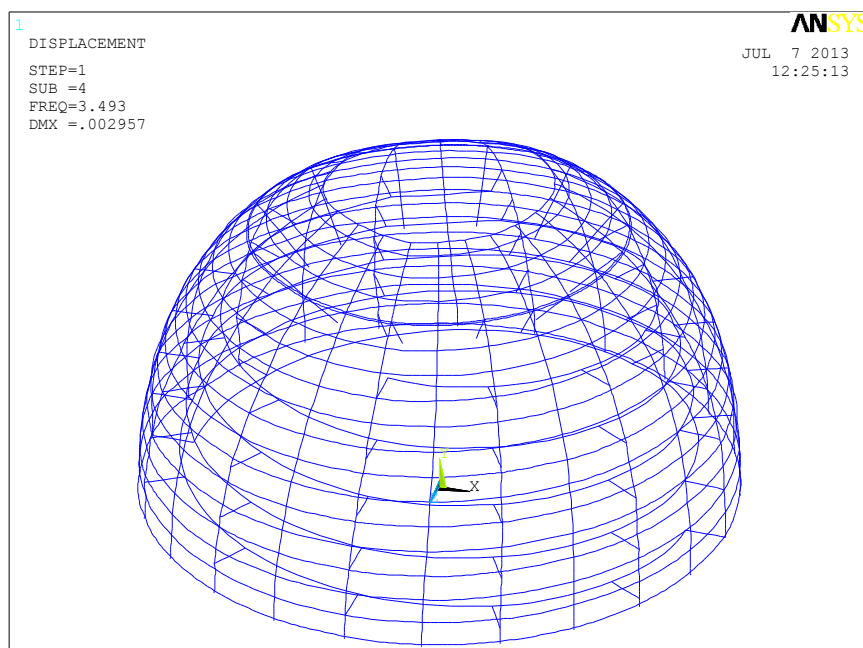


Figura 93. Modo de vibración 4.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Modo 5: 3.785Hz.

Se produce torsión desde la base, haciendo que todas las costillas giren de igual modo.

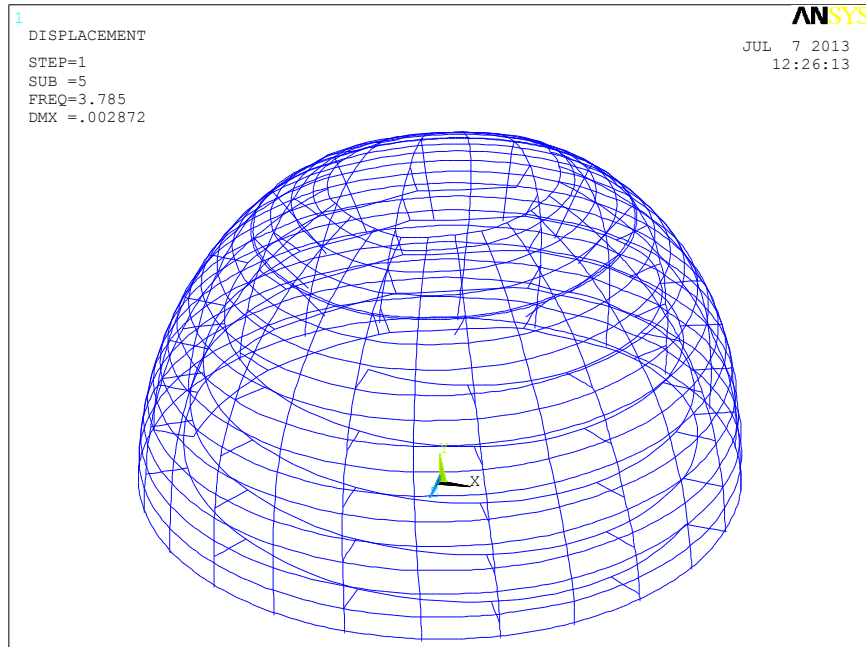


Figura 94. Modo de vibración 5.

- Modo 6: 4.412Hz.

Se produce torsión en las costillas y ésta hace girar a la estructura de forma desigual.

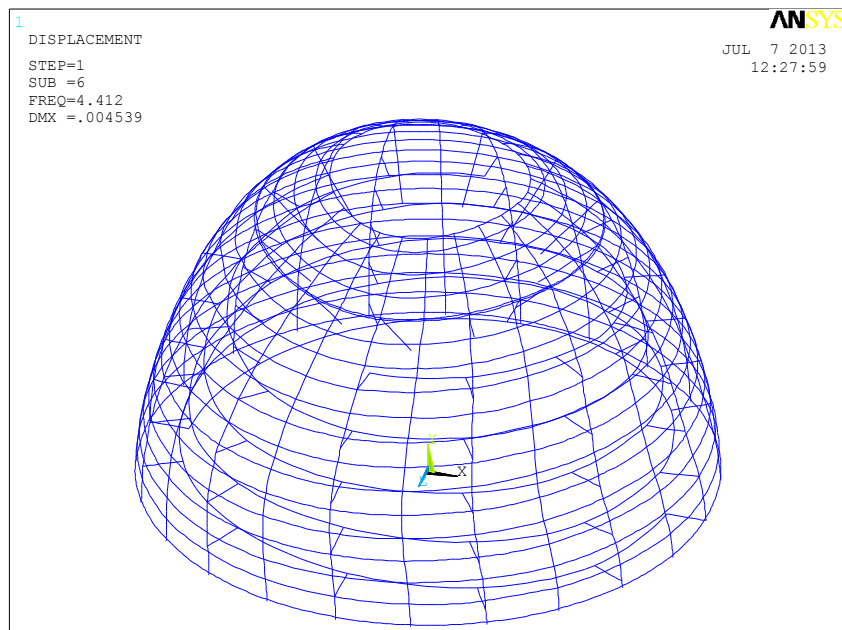


Figura 95. Modo de vibración 6.

Capítulo 4

Conclusiones.

Tras la lectura completa de este Proyecto Fin de Carrera, considero que los objetivos que se han marcado en un inicio quedan totalmente satisfechos y por tanto, se concluye:

- El modelo numérico de la estructura se ha realizado de un modo lo más fiel posible asumiendo las hipótesis pertinentes. Para ello se ha buscado toda la información posible para comprender como es el funcionamiento estructural de la cúpula.

- Se ha realizado un análisis tenso-deformacional en el que se ha estudiado cada condición de carga por separado, con y sin rampas, para comprobar lo que aporta a la estructura cada carga y ver la influencia de las rampas en la estructura. Con este análisis se comprobó que la hipótesis más desfavorable de carga en ambos supuestos es sin lugar a dudas la temperatura. A su vez, también se comprobó que la causa de asimetría en el peso propio son las rampas, ya que en los otros supuestos, apenas afectaban al comportamiento de la estructura.

- Se han variado las condiciones de apoyo de las estructura. En un principio eran de empotramiento para después variar a apoyo simple. En las tensiones axiales solamente afectan a los puntos cercanos a los apoyo, aumentando su valor significativamente en las condiciones de apoyado, en los flectores en el apoyo tiene valor cero, suceso que no ocurría en el empotramiento y el las tensiones máximas

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

repercute ligeramente en toda la estructura obteniéndose mayores tensiones cuando está apoyado.

- Se ha realizado un análisis tenso-deformacional de la estructura completa con todas las cargas mayoradas según la normativa contemplada en el Eurocódigo 3 para llegar a la conclusión que la estructura “soporta” holgadamente las cargas a las que está sometida.

- Se ha demostrado la utilidad que pueden tener los software de elementos finitos para el cálculo estructural.

Capítulo 5

Trabajos futuros.

En el análisis realizado la cúpula del Reichstag, han quedado sin contemplar una serie de estudios que pueden ser objeto de estudio en trabajos posteriores:

- En este proyecto solamente se han considerado la carga que aporta la estructura, la temperatura y el viento, quedando excluidas la nieve y cargas sísmicas. Por tanto queda un camino abierto en el que se pueden considerar estas cargas.
- Realizar un análisis en profundidad de las uniones de la estructura ya que, al asumir ciertas simplificaciones se ha podido perder la influencia que puede tener su resistencia en la estructura global.
- Las frecuencias propias de vibración que se han obtenido poseen un valor relativamente pequeño. Por tanto se debería de desarrollar un estudio de los modos propios de vibración y de las cargas que podrían generar la entrada en resonancia de la estructura.
- Realizar una optimización de la estructura ya que absolutamente todas las tensiones que soporta son mucho menores al límite elástico. Por tanto, a través de un programa de elementos finitos se podría reducir la cantidad de material utilizado y con ello comprobar el ahorro económico que hubiera supuesto.



CAPÍTULO 5: TRABAJOS FUTUROS

Capítulo 6

Bibliografía.

6.1 Libros

- "El método de los elementos finitos", O.C. Zienkiewicz/ Editorial Reverté, 1982.
- "Rebuilding the Reichstag", Norman Foster, Weidenfeld and Nicholson, 2000
- "Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos. Análisis estático lineal", Eugenio Oñate/ CINME, 1992.

6.2 Normas

- UNE -EN 1991 Eurocódigo 1: Bases de cálculo y acciones estructurales
- UNE -EN 1993 Eurocódigo 3: Cálculo de estructuras de acero

6.3 Páginas o documentos electrónicos en la red

- http://www.iit.upcomillas.es/~carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf, accedido en marzo 2013. Autor A. carnicero
- http://www.bundestag.de/htdocs_e/, accedido en abril de 2013
- <http://www.fosterandpartners.com/projects/reichstag-new-german-parliament/>, accedido en abril de 2013
- http://www.tectonica.es/arquitectura/energia/instalaciones/arquitectura_sostenible.html, accedido en abril 2013
- http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/epa/alumnos2005/Ejercicios/ej_1-2005/Ej1-epa2005-prietoquiros; accedido en junio 2013
- <http://deim.urv.cat/~bherrera/2.pdf>, accedido en junio 2013
- http://www.constructalia.com/espanol/galeria_de_proyectos/alemania/transformacion_del_reichstag_nuevo_parlamento_aleman_, accedido junio 2013

Anexos

Anexo 1

En dicho anexo se incluirán las tablas correspondientes a los puntos exteriores de la cúpula y los puntos de la rampa

ANEXOS

Geometría	y	Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4	
		x	z	X	z	x	z	x	z
Anillo superior	23,500	6,823	0,000	-6,823	0,000	0,000	6,823	0,000	-6,823
Meridiano 1	23,020	7,801	0,000	-7,801	0,000	0,000	7,801	0,000	-7,801
Meridiano 2	22,157	9,264	0,000	-9,264	0,000	0,000	9,264	0,000	-9,264
Meridiano 3	21,165	10,644	0,000	-10,644	0,000	0,000	10,644	0,000	-10,644
Meridiano 4	20,061	11,935	0,000	-11,935	0,000	0,000	11,935	0,000	-11,935
Meridiano 5	18,855	13,133	0,000	-13,133	0,000	0,000	13,133	0,000	-13,133
Meridiano 6	17,561	14,235	0,000	-14,235	0,000	0,000	14,235	0,000	-14,235
Meridiano 7	16,191	15,239	0,000	-15,239	0,000	0,000	15,239	0,000	-15,239
Meridiano 8	14,753	16,146	0,000	-16,146	0,000	0,000	16,146	0,000	-16,146
Meridiano 9	13,258	16,956	0,000	-16,956	0,000	0,000	16,956	0,000	-16,956
Meridiano 10	11,715	17,668	0,000	-17,668	0,000	0,000	17,668	0,000	-17,668
Meridiano 11	10,192	18,262	0,000	-18,262	0,000	0,000	18,262	0,000	-18,262
Meridiano 12	8,575	18,787	0,000	-18,787	0,000	0,000	18,787	0,000	-18,787
Meridiano 13	6,930	19,216	0,000	-19,216	0,000	0,000	19,216	0,000	-19,216
Meridiano 14	5,264	19,552	0,000	-19,552	0,000	0,000	19,552	0,000	-19,552
Meridiano 15	3,582	19,794	0,000	-19,794	0,000	0,000	19,794	0,000	-19,794
Meridiano 16	1,899	19,942	0,000	-19,942	0,000	0,000	19,942	0,000	-19,942
Meridiano 17	0,200	19,999	0,000	-19,999	0,000	0,000	19,999	0,000	-19,999
Base	0,000	20,000	0,000	-20,000	0,000	0,000	20,000	0,000	-20,000

Tabla 17. Puntos de la geometría exterior de la cúpula.

ANEXOS

Geometría	y	Punto 5		Punto 6		Punto 7		Punto 8	
		x	z	x	z	x	z	x	z
Anillo superior	23,500	1,766	6,591	-1,766	6,591	1,766	-6,591	-1,766	-6,591
Meridiano 1	23,020	2,019	7,535	-2,019	7,535	2,019	-7,535	-2,019	-7,535
Meridiano 2	22,157	2,398	8,948	-2,398	8,948	2,398	-8,948	-2,398	-8,948
Meridiano 3	21,165	2,755	10,281	-2,755	10,281	2,755	-10,281	-2,755	-10,281
Meridiano 4	20,061	3,089	11,529	-3,089	11,529	3,089	-11,529	-3,089	-11,529
Meridiano 5	18,855	3,399	12,685	-3,399	12,685	3,399	-12,685	-3,399	-12,685
Meridiano 6	17,561	3,684	13,750	-3,684	13,750	3,684	-13,750	-3,684	-13,750
Meridiano 7	16,191	3,944	14,720	-3,944	14,720	3,944	-14,720	-3,944	-14,720
Meridiano 8	14,753	4,179	15,596	-4,179	15,596	4,179	-15,596	-4,179	-15,596
Meridiano 9	13,258	4,389	16,378	-4,389	16,378	4,389	-16,378	-4,389	-16,378
Meridiano 10	11,715	4,573	17,066	-4,573	17,066	4,573	-17,066	-4,573	-17,066
Meridiano 11	10,192	4,727	17,640	-4,727	17,640	4,727	-17,640	-4,727	-17,640
Meridiano 12	8,575	4,862	18,147	-4,862	18,147	4,862	-18,147	-4,862	-18,147
Meridiano 13	6,930	4,974	18,561	-4,974	18,561	4,974	-18,561	-4,974	-18,561
Meridiano 14	5,264	5,060	18,885	-5,060	18,885	5,060	-18,885	-5,060	-18,885
Meridiano 15	3,582	5,123	19,119	-5,123	19,119	5,123	-19,119	-5,123	-19,119
Meridiano 16	1,899	5,161	19,263	-5,161	19,263	5,161	19,263	-5,161	-19,263
Meridiano 17	0,200	5,176	19,318	-5,176	19,318	5,176	19,318	-5,176	-19,318
Base	0,000	5,176	19,319	-5,176	19,319	5,176	-19,319	-5,176	-19,319

Tabla 18. Puntos de la geometría exterior de la cúpula.

ANEXOS

Geometría	y	Punto 9		Punto 10		Punto 11		Punto 12	
		x	z	x	z	x	z	x	z
Anillo superior	23,500	6,591	1,766	6,591	-1,766	-6,591	1,766	-6,591	-1,766
Meridiano 1	23,020	7,535	2,019	7,535	-2,019	-7,535	2,019	-7,535	-2,019
Meridiano 2	22,157	8,948	2,398	8,948	-2,398	-8,948	2,398	-8,948	-2,398
Meridiano 3	21,165	10,281	2,755	10,281	-2,755	-10,281	2,755	-10,281	-2,755
Meridiano 4	20,061	11,529	3,089	11,529	-3,089	-11,529	3,089	-11,529	-3,089
Meridiano 5	18,855	12,685	3,399	12,685	-3,399	-12,685	3,399	-12,685	-3,399
Meridiano 6	17,561	13,750	3,684	13,750	-3,684	-13,750	3,684	-13,750	-3,684
Meridiano 7	16,191	14,720	3,944	14,720	-3,944	-14,720	3,944	-14,720	-3,944
Meridiano 8	14,753	15,596	4,179	15,596	-4,179	-15,596	4,179	-15,596	-4,179
Meridiano 9	13,258	16,378	4,389	16,378	-4,389	-16,378	4,389	-16,378	-4,389
Meridiano 10	11,715	17,066	4,573	17,066	-4,573	-17,066	4,573	-17,066	-4,573
Meridiano 11	10,192	17,640	4,727	17,640	-4,727	-17,640	4,727	-17,640	-4,727
Meridiano 12	8,575	18,147	4,862	18,147	-4,862	-18,147	4,862	-18,147	-4,862
Meridiano 13	6,930	18,561	4,974	18,561	-4,974	-18,561	4,974	-18,561	-4,974
Meridiano 14	5,264	18,885	5,060	18,885	-5,060	-18,885	5,060	-18,885	-5,060
Meridiano 15	3,582	19,119	5,123	19,119	-5,123	-19,119	5,123	-19,119	-5,123
Meridiano 16	1,899	19,263	5,161	19,263	-5,161	-19,263	5,161	-19,263	-5,161
Meridiano 17	0,200	19,318	5,176	19,318	-5,176	-19,318	5,176	-19,318	-5,176
Base	0,000	19,319	5,176	19,319	-5,176	-19,319	5,176	-19,319	-5,176

Tabla 19. Puntos de la geometría exterior de la cúpula.

ANEXOS

Geometría	y	Punto 13		Punto 14		Punto 15		Punto 16	
		x	z	x	z	x	z	x	z
Anillo superior	23,500	3,412	5,909	3,412	-5,909	-3,412	5,909	-3,412	-5,909
Meridiano 1	23,020	3,900	6,756	3,900	-6,756	-3,900	6,756	-3,900	-6,756
Meridiano 2	22,157	4,632	8,023	4,632	-8,023	-4,632	8,023	-4,632	-8,023
Meridiano 3	21,165	5,322	9,218	5,322	-9,218	-5,322	9,218	-5,322	-9,218
Meridiano 4	20,061	5,968	10,336	5,968	-10,336	-5,968	10,336	-5,968	-10,336
Meridiano 5	18,855	6,566	11,373	6,566	-11,373	-6,566	11,373	-6,566	-11,373
Meridiano 6	17,561	7,117	12,328	7,117	-12,328	-7,117	12,328	-7,117	-12,328
Meridiano 7	16,191	7,620	13,198	7,620	-13,198	-7,620	13,198	-7,620	-13,198
Meridiano 8	14,753	8,073	13,983	8,073	-13,983	-8,073	13,983	-8,073	-13,983
Meridiano 9	13,258	8,478	14,684	8,478	-14,684	-8,478	14,684	-8,478	-14,684
Meridiano 10	11,715	8,834	15,301	8,834	-15,301	-8,834	15,301	-8,834	-15,301
Meridiano 11	10,192	9,131	15,816	9,131	-15,816	-9,131	15,816	-9,131	-15,816
Meridiano 12	8,575	9,393	16,270	9,393	-16,270	-9,393	16,270	-9,393	-16,270
Meridiano 13	6,930	9,608	16,642	9,608	-16,642	-9,608	16,642	-9,608	-16,642
Meridiano 14	5,264	9,776	16,932	9,776	-16,932	-9,776	16,932	-9,776	-16,932
Meridiano 15	3,582	9,897	17,142	9,897	-17,142	-9,897	17,142	-9,897	-17,142
Meridiano 16	1,899	9,971	17,270	9,971	-17,270	-9,971	17,270	-9,971	-17,270
Meridiano 17	0,200	10,000	17,320	10,000	-17,320	-10,000	17,320	-10,000	-17,320
Base	0,000	10,000	17,320	-10,000	17,320	10,000	-17,320	-10,000	-17,320

Tabla 20. Puntos de la geometría exterior de la cúpula.

ANEXOS

Geometría	y	Punto 17		Punto 18		Punto 19		Punto 20	
		x	z	x	z	x	z	x	z
Anillo superior	23,500	5,909	3,412	-5,909	3,412	5,909	-3,412	-5,909	-3,412
Meridiano 1	23,020	6,756	3,900	-6,756	3,900	6,756	-3,900	-6,756	-3,900
Meridiano 2	22,157	8,023	4,632	-8,023	4,632	8,023	-4,632	-8,023	-4,632
Meridiano 3	21,165	9,218	5,322	-9,218	5,322	9,218	-5,322	-9,218	-5,322
Meridiano 4	20,061	10,336	5,968	-10,336	5,968	10,336	-5,968	-10,336	-5,968
Meridiano 5	18,855	11,373	6,566	-11,373	6,566	11,373	-6,566	-11,373	-6,566
Meridiano 6	17,561	12,328	7,117	-12,328	7,117	12,328	-7,117	-12,328	-7,117
Meridiano 7	16,191	13,198	7,620	-13,198	7,620	13,198	-7,620	-13,198	-7,620
Meridiano 8	14,753	13,983	8,073	-13,983	8,073	13,983	-8,073	-13,983	-8,073
Meridiano 9	13,258	14,684	8,478	-14,684	8,478	14,684	-8,478	-14,684	-8,478
Meridiano 10	11,715	15,301	8,834	-15,301	8,834	15,301	-8,834	-15,301	-8,834
Meridiano 11	10,192	15,816	9,131	-15,816	9,131	15,816	-9,131	-15,816	-9,131
Meridiano 12	8,575	16,270	9,393	-16,270	9,393	16,270	-9,393	-16,270	-9,393
Meridiano 13	6,930	16,642	9,608	-16,642	9,608	16,642	-9,608	-16,642	-9,608
Meridiano 14	5,264	16,932	9,776	-16,932	9,776	16,932	-9,776	-16,932	-9,776
Meridiano 15	3,582	17,142	9,897	-17,142	9,897	17,142	-9,897	-17,142	-9,897
Meridiano 16	1,899	17,270	9,971	-17,270	9,971	17,270	-9,971	-17,270	-9,971
Meridiano 17	0,200	17,320	10,000	-17,320	10,000	17,320	-10,000	-17,320	-10,000
Base	0,000	17,321	10,000	-17,321	10,000	17,321	-10,000	-17,320	-10,000

Tabla 21. Puntos de la geometría exterior de la cúpula.

ANEXOS

Geometría	y	Punto 21		Punto 22		Punto 23		Punto 24	
		x	z	x	z	x	z	x	z
Anillo superior	23,500	4,825	4,825	4,825	-4,825	-4,825	4,825	-4,825	-4,825
Meridiano 1	23,020	5,516	5,516	5,516	-5,516	-5,516	5,516	-5,516	-5,516
Meridiano 2	22,157	6,550	6,550	6,550	-6,550	-6,550	6,550	-6,550	-6,550
Meridiano 3	21,165	7,527	7,526	7,527	-7,526	-7,526	7,527	-7,526	-7,526
Meridiano 4	20,061	8,439	8,439	8,439	-8,439	-8,439	8,439	-8,439	-8,439
Meridiano 5	18,855	9,286	9,286	9,286	-9,286	-9,286	9,286	-9,286	-9,286
Meridiano 6	17,561	10,066	10,066	10,066	-10,066	-10,066	10,066	-10,066	-10,066
Meridiano 7	16,191	10,776	10,776	10,776	-10,776	-10,776	10,776	-10,776	-10,776
Meridiano 8	14,753	11,417	11,417	11,417	-11,417	-11,417	11,417	-11,417	-11,417
Meridiano 9	13,258	11,990	11,990	11,990	-11,990	-11,990	11,990	-11,990	-11,990
Meridiano 10	11,715	12,493	12,493	12,493	-12,493	-12,493	12,493	-12,493	-12,493
Meridiano 11	10,192	12,914	12,914	12,914	-12,914	-12,914	12,914	-12,914	-12,914
Meridiano 12	8,575	13,284	13,284	13,284	-13,284	-13,284	13,284	-13,284	-13,284
Meridiano 13	6,930	13,588	13,588	13,588	-13,588	-13,588	13,588	-13,588	-13,588
Meridiano 14	5,264	13,825	13,825	13,825	-13,825	-13,825	13,825	-13,825	-13,825
Meridiano 15	3,582	13,996	13,996	13,996	-13,996	-13,996	13,996	-13,996	-13,996
Meridiano 16	1,899	14,101	14,101	14,101	-14,101	-14,101	14,101	-14,101	-14,101
Meridiano 17	0,200	14,142	14,142	14,142	-14,142	-14,142	14,142	-14,142	-14,142
Base	0,000	14,142	14,142	14,142	-14,142	-14,142	14,142	-14,142	-14,142

Tabla 22. Puntos de la geometría exterior de la cúpula.

ANEXOS

RAMPA 1								
θ (Grados)	θ (Radianes)	y (m)	RA (m)	x (m)	z (m)	RA interior (m)	x interior (m)	z interior (m)
0	0,00	0,00	20,00	20,00	0,00	17,20	17,20	0,00
30	0,52	0,60	19,99	17,32	10,00	17,19	14,89	8,60
60	1,05	1,20	19,98	9,99	17,30	17,18	8,59	14,88
90	1,57	1,80	19,95	0,00	19,95	17,15	0,00	17,15
120	2,09	2,40	19,91	-9,95	17,24	17,11	-8,55	14,82
150	2,62	3,00	19,86	-17,20	9,93	17,06	-14,77	8,53
180	3,14	3,60	19,79	-19,80	0,00	16,99	-16,99	0,00
210	3,67	4,20	19,72	-17,08	-9,86	16,92	-14,65	-8,46
240	4,19	4,80	19,63	-9,81	-17,00	16,83	-8,41	-14,57
270	4,71	5,40	19,53	0,00	-19,53	16,73	0,00	-16,73
300	5,24	6,00	19,42	9,71	-16,82	16,62	8,31	-14,39
330	5,76	6,60	19,29	16,71	-9,65	16,49	14,28	-8,25
360	6,28	7,20	19,15	19,15	0,00	16,35	16,35	0,00
390	6,81	7,80	19,00	16,46	9,50	16,20	14,03	8,10
420	7,33	8,40	18,84	9,42	16,32	16,04	8,02	13,89
450	7,85	9,00	18,66	0,00	18,66	15,86	0,00	15,86
480	8,38	9,59	18,47	-9,24	15,99	15,67	-7,83	13,57
510	8,90	10,19	18,26	-15,82	9,13	15,46	-13,39	7,73
540	9,42	10,79	18,04	-18,04	0,00	15,24	-15,24	0,00
570	9,95	11,39	17,80	-15,42	-8,90	15,00	-12,99	-7,50
600	10,47	11,99	17,55	-8,77	-15,2	14,75	-7,37	-12,77
630	11,00	12,59	17,28	0,00	-17,28	14,48	0,00	-14,48
660	11,52	13,19	16,99	8,50	-14,71	14,19	7,10	-12,29
690	12,04	13,79	16,68	14,45	-8,34	13,88	12,02	-6,94
720	12,57	14,39	16,35	16,35	0,00	13,55	13,55	0,00
750	13,09	14,99	16,00	13,86	8,00	13,20	11,44	6,60
780	13,61	15,59	15,63	7,82	13,54	12,83	6,42	11,12
810	14,14	16,19	15,24	-0,00	15,24	12,44	0,00	12,44

Tabla 23.Puntos rampa 1

ANEXOS

RAMPA 2								
θ (Grados)	θ (Radianes)	y (m)	RA (m)	x (m)	z (m)	RA interior (m)	x interior (m)	z interior (m)
180	3,14	0,00	20,00	-20,00	0,00	17,20	-17,20	0,00
210	3,67	0,60	19,99	-17,32	-10,00	17,19	-14,89	-8,60
240	4,19	1,20	19,98	-9,99	-17,30	17,18	-8,59	-14,88
270	4,71	1,80	19,95	0,00	-19,95	17,15	0,00	-17,15
300	5,24	2,40	19,91	9,95	-17,24	17,11	8,55	-14,82
330	5,76	3,00	19,86	17,20	-9,93	17,06	14,77	-8,53
360	6,28	3,60	19,79	19,79	0,00	16,99	16,99	0,00
390	6,81	4,20	19,72	17,07	9,86	16,92	14,65	8,46
420	7,33	4,80	19,63	9,81	17,00	16,83	8,41	14,57
450	7,85	5,40	19,53	0,00	19,53	16,73	0,00	16,73
480	8,38	6,00	19,42	-9,71	16,81	16,62	-8,31	14,39
510	8,90	6,60	19,29	-16,71	9,65	16,49	-14,28	8,25
540	9,42	7,20	19,15	-19,15	0,00	16,35	-16,35	0,00
570	9,95	7,80	19,00	-16,46	-9,50	16,20	-14,03	-8,10
600	10,47	8,40	18,84	-9,42	-16,31	16,04	-8,02	-13,89
630	11,00	9,00	18,66	0,00	-18,66	15,86	0,00	-15,86
660	11,52	9,59	18,47	9,23	-15,99	15,67	7,83	-13,57
690	12,04	10,19	18,26	15,82	-9,13	15,46	13,39	-7,73
720	12,57	10,79	18,04	18,04	0,00	15,24	15,24	0,00
750	13,09	11,39	17,80	15,42	8,90	15,00	12,99	7,50
780	13,61	11,99	17,55	8,77	15,20	14,75	7,37	12,77
810	14,14	12,59	17,28	0,00	17,28	14,48	0,00	14,48
840	14,66	13,19	16,99	-8,49	14,71	14,19	-7,09	12,29
870	15,18	13,79	16,68	-14,45	8,34	13,88	-12,02	6,94
900	15,71	14,39	16,35	-16,35	0,00	13,55	-13,55	0,00
930	16,23	14,99	16,00	-13,86	-8,00	13,20	-11,44	-6,60
960	16,76	15,59	15,63	-7,82	-13,54	12,83	-6,42	-11,11
990	17,28	16,19	15,24	0,00	-15,24	12,44	0,00	-12,44

Tabla 24. Puntos rampa 2.

